

# EMPREINTE CARBONE DE DIFFÉRENTS CONCEPTS D'HABITATION ÉCOLOGIQUE AU QUÉBEC

Par  
Dominic Gendron

Essai présenté au Centre universitaire de formation en  
environnement et en développement durable en vue de  
l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Pierre Etcheverry

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Juillet 2021

## SOMMAIRE

Mots-clés : habitation écologique, empreinte carbone, analyse du cycle de vie, gaz à effet de serre, quantification, émissions intrinsèques, émissions opérationnelles, Québec.

L'importance des changements climatiques et leurs répercussions grandissantes menacent le bien-être des habitants de la terre. Cette urgence climatique demande aux humains d'adapter leurs comportements rapidement, ce qui implique de grands efforts et certains sacrifices. Les actions visant à améliorer l'empreinte carbone individuelle sont déjà suggérées en grande quantité aux citoyens. Leur réel impact est toutefois rarement bien mesuré et il demeure donc difficile de choisir celles qui devraient être priorisées. Les cibles de réduction des gaz à effet de serre sont audacieuses, il est alors important de se doter d'un plan de réduction efficace afin de limiter les efforts à fournir. Une des étapes les plus importantes d'un plan de réduction rigoureux est la quantification. Elle est cependant très complexe et souvent, malheureusement, inaccessible pour le public.

Certains citoyens consciencieux s'intéressent entre autres aux différents concepts d'habitation écologique. Cet essai vise à guider ces citoyens dans leurs décisions en effectuant la quantification des émissions d'une maison québécoise et de ses alternatives écologiques. Le Québec s'est doté d'une électricité des plus propres au monde, il est donc nécessaire d'offrir une analyse adaptée à ce contexte particulier. La méthode de quantification la plus appropriée pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre d'une maison est l'analyse du cycle de vie. Le logiciel Impact Estimator permet d'appliquer cette méthode aux bâtiments en contexte québécois. Il quantifie les émissions associées à toutes les étapes du cycle de vie d'une maison et à l'ensemble de ses matériaux. Le simulateur énergétique HOT2000 est utilisé en complément pour évaluer les besoins en énergie du bâtiment. Grâce à ces outils, l'analyse du cycle de vie a pu être effectuée pour différents modèles de maison. Une maison de référence sert de point de comparaison. Cette maison de type bungalow, avec un sous-sol, chauffant à l'électricité et usant de matériaux communs représente le type de maison le plus souvent construit au Québec encore à ce jour. Différents concepts d'habitation écologique ont ensuite été appliqués à cette maison, autant individuellement que de façon combinée. Les modifications testées incluent des maisons sans sous-sol, de plus petite taille, logeant plus d'habitants, mieux isolés, plus efficaces énergétiquement, utilisant des matériaux écologiques et dont les habitants ont de meilleures habitudes de consommation.

Ce travail a démontré qu'il fallait, en priorité, éviter les systèmes de chauffages aux énergies fossiles. Les résultats ont aussi révélé qu'il était possible, en combinant plusieurs modifications écologiques, de réduire l'empreinte carbone de la maison de référence de près de la moitié. Toutefois, le constat le plus marquant qui ressort de cette étude est que la maison typique québécoise génère une quantité d'émissions qui contribue peu à l'empreinte carbone globale d'un individu. En conséquence, les efforts de réduction devraient d'abord être investis ailleurs, notamment sur les habitudes de transport et d'alimentation.

## ABSTRACT

Keywords : eco-friendly housing, carbon footprint, life cycle analysis, greenhouse gas, quantification, embodied emissions, operational emissions, Quebec.

Climate change and its growing impacts are threatening the earth's inhabitant well-being. The urgency of the situation forces humans to quickly adapt their behaviors, which implies great efforts and some sacrifices. Actions to reduce carbon footprint are already proposed to citizens in great numbers. The actual impact of these actions is, however rarely well understood and therefore it is impossible to prioritize them. The targets for the reduction of greenhouse gas emissions are bold enough, it is then important to follow an efficient reduction plan to avoid making more sacrifices than necessary. One of the most important steps in the making of a rigorous reduction plan is the quantification. It is however very complex to perform and unfortunately often inaccessible to the public.

Some committed citizens take a particular interest in the various eco-friendly home concepts. This essay aims to provide them with guidance with their decisions by performing the quantification of the emissions for a Quebec house and its ecological alternatives. Quebec has one of the cleanest electricity in the world, and thus it is necessary to provide an analysis that is adapted to this particular context. The most appropriate quantification method to evaluate the emissions of a house is the life cycle analysis. The software Impact Estimator allows the application of this method to buildings on the Quebec territory. It quantifies the emissions associated with every life cycle stage of a house and of all the materials it uses. The energy simulation modeling software HOT2000 is used in complement to evaluate the energy usage of the building. With these tools, it has been possible to perform the life cycle analysis of different house models. A house of reference was first defined, and it serves of a benchmark for the other models. This bungalow style house, with a basement, heating with electricity and using common materials represents the type of house that is still mostly built in Quebec today. Different eco-friendly home concepts were then applied to this house of reference, individually and in combination. The tested models include houses without basement, that are smaller, hosting more occupants, that are better insulated, more energy efficient, using some eco-friendly materials and for which habitants have better consumption habits.

This study showed that the most impactful criteria was to avoid any heating systems that uses fossil fuels. The results also revealed that it was possible, by combining many eco-friendly modifications, to reduce the carbon footprint of the house of reference nearly by half. However, the most notable finding from this study is that the emissions caused by the typical Quebec house already contribute to just a very minor part of the average individual carbon footprint. In consequence, the efforts of reduction should first be invested elsewhere, particularly on the bigger contributors associated with the lifestyle like the transport and the eating habits.

## **REMERCIEMENTS**

Évidemment, merci à Pierre Etcheverry, mon directeur, qui m'a bien orienté et guidé à travers ma rédaction et dans le développement de mes idées. Nous avons partagé des discussions inspirantes qui même souvent allaient au-delà du cadre de mon essai.

Merci aux enseignants de l'Université de Sherbrooke qui ont partagé et continuent de partager leur savoir avec passion à leurs étudiants. Je remercie aussi et souhaite bonne continuité à mes collègues de classe qui ont rendu le parcours de la maîtrise beaucoup plus inspirant et divertissant.

Merci à quiconque qui a bien voulu, à un moment donné, m'écouter raconter mon essai. Un merci spécial à mes proches qui m'ont supporté de près.

Enfin, merci aux trois personnes qui vont lire mon essai et bonne lecture.

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	1
1 MISE EN CONTEXTE .....	5
2 MÉTHODES DE QUANTIFICATIONS ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE .....	7
2.1 L'empreinte des Québécois et les aspects importants en quantification .....	7
2.2 Empreinte des habitations québécoises .....	10
2.3 Méthodes de quantifications .....	11
2.4 Étapes de réalisation de l'ACV .....	12
2.5 Étapes du cycle de vie .....	13
2.6 ACV du bâtiment .....	13
3 MÉTHODOLOGIE .....	16
3.1 Maison de référence .....	17
3.1.1 Les sources d'information .....	17
3.1.2 Description du modèle de référence .....	18
3.1.3 Justification des caractéristiques de la maison de référence .....	22
3.2 Quantification des émissions intrinsèques .....	26
3.2.1 Fonctionnement du logiciel de modélisation des émissions intrinsèques - IE .....	26
3.3 Quantification des émissions opérationnelles .....	30
3.3.1 Fonctionnement du logiciel de modélisation énergétique - HOT2000 .....	30
3.4 Empreinte carbone globale .....	32
3.5 Post-traitement .....	33
4 RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE LA MAISON DE RÉFÉRENCE .....	35
5 ANALYSE DES MODIFICATIONS INDIVIDUELLES .....	38
5.1 Sélection des concepts écologiques et modifications testées .....	38
5.2 Analyse du concept écologique – Modification du design .....	39
5.2.1 Maison à 2 étages .....	39
5.2.2 Maison 50% plus petite .....	41
5.2.3 Maison de même taille, mais logeant le double d'habitants .....	41
5.3 Maison durable .....	42

5.4	Analyse du concept écologique - Amélioration de l'isolation .....	42
5.4.1	Ajout de panneaux isolants en polystyrène extrudé.....	42
5.4.2	Fenêtres haute performance .....	43
5.4.3	Laine plus épaisse .....	44
5.5	Analyse du concept écologique - Efficacité énergétique.....	44
5.5.1	Étanchéité supérieure.....	44
5.5.2	Appareils et électroménagers efficaces .....	45
5.5.3	VRC et A/C efficaces.....	46
5.6	Analyse du concept écologique - Matériaux écologiques .....	47
5.6.1	Polyisocyanurate .....	48
5.6.2	Chanvre .....	48
5.6.3	Paille .....	49
5.6.4	Béton écologique - ajout cimentaire à 25%.....	49
5.7	Analyse du concept écologique - Meilleures habitudes de consommation.....	50
5.8	Analyse du concept écologique – Système de chauffage alternatif.....	51
6	ANALYSE DES COMBINAISONS DE MODIFICATIONS .....	53
6.1	Isolation maximale - C1 .....	54
6.2	Efficacité énergétique – C7 ou 3 .....	55
6.3	Matériaux alternatifs – C9.....	55
7	SOMMAIRE DES RÉSULTATS .....	56
8	DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS.....	60
8.1	Cadre d'applicabilité .....	60
8.2	Facteurs affectant la précision et la fiabilité .....	61
8.2.1	La précision du facteur d'émission de l'électricité québécoise.....	62
8.2.2	La fiabilité des PRP .....	62
8.2.3	La fiabilité des logiciels .....	63
8.2.4	Les choix arbitraires .....	64
8.2.5	La difficulté de la validation .....	64
8.3	Complétude .....	64

8.4	Recommandations.....	65
8.4.1	Recommandations concernant la méthode.....	65
8.4.2	Recommandations concernant les émissions de la maison .....	66
8.4.3	Réflexion et recommandations générales .....	67
CONCLUSION.....		74
RÉFÉRENCES .....		76
ANNEXE 1 – Approximation du PRP de la paille .....		80

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 2.1	Empreintes GES par habitant basées sur la consommation et sur la production pour les provinces canadiennes .....	9
Figure 2.2	Étapes de la réalisation de l'ACV .....	12
Figure 2.3	Étapes du cycle de vie .....	13
Figure 2.4	Étapes et sous-étapes de l'ACV d'un bâtiment .....	14
Figure 3.1	Diagramme illustrant le processus itératif d'ACV pour ce projet .....	16
Figure 3.2	Maison existante servant d'inspiration.....	18
Figure 3.3	Coupe de mur type d'un plan de maison au Code de construction du Québec.....	23
Figure 3.4	Configuration des pièces du premier étage (gauche) et du sous-sol (droite) .....	24
Figure 3.5	Requis d'échange d'air en fonction de la superficie de plancher et du nombre de chambres à coucher selon LEED .....	25
Figure 3.6	Aperçu de l'arbre des composantes pour le modèle de la maison de référence dans IE.....	27
Figure 3.7	Aperçu de la sélection des paramètres pour les murs dans IE .....	27
Figure 3.8	Aperçu de la sélection des paramètres pour les portes et les fenêtres dans IE .....	28
Figure 3.9	Aperçu de la sélection des paramètres d'enveloppe dans IE .....	28
Figure 3.10	Liste des isolants muraux disponibles dans IE.....	29
Figure 3.11	Exemple de résultats par groupe d'assemblage dans IE .....	30
Figure 3.12	Aperçu de la modélisation d'un mur dans HOT2000.....	31
Figure 3.13	Aperçu du résumé des résultats fourni par le rapport de HOT2000.....	32
Figure 3.14	Exemple de tableau compilant les résultats .....	33
Figure 5.1	Dalle monolithique - plan de Dessins Drummond et dimensions de la dalle .....	40
Figure 8.1	Équation de transfert de chaleur par conduction thermique.....	61
Tableau 2.1	Émissions annuelles totales et par habitant de divers pays.....	8
Tableau 3.1	Caractéristiques physiques de la maison de référence.....	18
Tableau 3.2	Caractéristiques énergétiques de la maison de référence .....	20
Tableau 3.3	Requis de ventilation par pièce selon le Code national du bâtiment.....	25



Tableau 3.4	Différence d'émissions dues au remplacement de la cellulose par le polyuréthane .....	34
Tableau 4.1	Résultats de l'analyse pour la maison de référence .....	35
Tableau 4.2	Comparaison des consommations d'électricité entre le modèle de référence et les moyennes d'Hydro-Québec (kWh/a) .....	36
Tableau 5.1	Modifications apportées à la maison de référence organisées en catégories.....	39
Tableau 5.2	Émissions du modèle : maison à 2 étages (kgCO <sub>2</sub> eq/a) .....	41
Tableau 5.3	Émissions du modèle : maison 50% plus petite (kgCO <sub>2</sub> eq/a) .....	41
Tableau 5.4	Émissions du modèle : maison logeant deux fois plus d'habitants (kgCO <sub>2</sub> eq/a) .....	42
Tableau 5.5	Émissions du modèle : maison plus durable (kgCO <sub>2</sub> eq/a) .....	42
Tableau 5.6	Modifications apportées au modèle : ajout de panneaux isolants en polystyrène extrudé .....	43
Tableau 5.7	Émissions du modèle : extra polystyrène (kgCO <sub>2</sub> eq/a) .....	43
Tableau 5.8	Différence entre les fenêtres de référence et les fenêtres performantes .....	43
Tableau 5.9	Émissions du modèle : fenêtres haute performance (kgCO <sub>2</sub> eq/a) .....	44
Tableau 5.10	Modifications apportées au modèle : laine plus épaisse .....	44
Tableau 5.11	Émissions du modèle : laine plus épaisse (kgCO <sub>2</sub> eq/a).....	44
Tableau 5.12	Émissions du modèle : étanchéité supérieure (kgCO <sub>2</sub> eq/a).....	45
Tableau 5.13	Modifications apportées au modèle : appareils et électroménagers efficaces .....	46
Tableau 5.14	Émissions du modèle : appareils et électroménagers efficaces (kgCO <sub>2</sub> eq/a).....	46
Tableau 5.15	Modifications apportées au modèle : VRC et A/C efficaces .....	46
Tableau 5.16	Émissions du modèle : VRC et A/C efficaces (kgCO <sub>2</sub> eq/a).....	47
Tableau 5.17	PRP et résistance thermique des différents isolants .....	47
Tableau 5.18	Émissions du modèle : polyisocyanurate en remplacement du polystyrène (kgCO <sub>2</sub> eq/a) .....	48
Tableau 5.19	Émissions du modèle : chanvre en remplacement de la laine (kgCO <sub>2</sub> eq/a) .....	49
Tableau 5.20	Émissions du modèle : chanvre en remplacement du polystyrène (kgCO <sub>2</sub> eq/a) .....	49
Tableau 5.21	Émissions du modèle : paille en remplacement de la laine (kgCO <sub>2</sub> eq/a).....	49
Tableau 5.22	Modifications apportées au modèle : béton écologique à 25% d'ajout cimentaire.....	50
Tableau 5.23	Émissions du modèle : béton écologique à 25% d'ajout cimentaire (kgCO <sub>2</sub> eq/a) .....	50

Tableau 5.24	Modifications apportées au modèle : meilleures habitudes de consommation .....	51
Tableau 5.25	Émissions du modèle : meilleures habitudes de consommation (kgCO <sub>2</sub> eq/a).....	51
Tableau 5.26	Émissions des modèles : systèmes de chauffage alternatifs (kgCO <sub>2</sub> eq/a) .....	52
Tableau 6.1	Combinaisons de modifications apportées à la maison de référence .....	54
Tableau 7.1	Résultats pour les modifications individuelles apportées au modèle de référence .....	56
Tableau 7.2	Résultats pour les combinaisons de modifications apportées au modèle de référence ...	57
Tableau 7.3	Effets des modifications ajoutées à la maison de référence et à la maison à 2 étages ....	58
Tableau 8.1	Proportion des émissions d'un citoyen québécois.....	69
Tableau 8.2	Réductions d'émissions associées aux mesures proposées (tCO <sub>2</sub> eq/a) .....	69
Tableau 8.3	Liste des actions évaluées avec le potentiel de réduction en tCO <sub>2</sub> eq.....	72
Tableau 8.4	Actions évaluées et triées en ordre de priorité avec le potentiel de réduction en tCO <sub>2</sub> eq .....	72

## LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

A/C	Air conditionné ou climatiseur
ACV	Analyse du cycle de vie
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning
CAH	Changement d'air à l'heure
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CCQ	Code de construction du Québec
CH <sub>4</sub>	Méthane
CIRAIG	Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
CO <sub>2</sub> eq	Dioxyde de carbone équivalent ou équivalent dioxyde de carbone
COP	Coefficient de performance
CSA	Canadian Standards Association
DEL	Diode électroluminescente
DEP	Déclaration environnementale de produit
ECC	Environnement et Changement climatique Canada
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IE	Impact Estimator
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
N <sub>2</sub> O	Protoxyde d'azote
ONU	Organisme des Nations Unies
PRP	Potentiel de réchauffement planétaire
RIN	Rapport d'inventaire national
RNCan	Ressources Naturelles Canada
VRC	Ventilateur récupérateur de chaleur
WWF	World Wildlife Fund

## INTRODUCTION

La crise climatique est au cœur des préoccupations de notre époque. Ses effets grandissants affectent déjà le monde, mettant en péril les écosystèmes, la biodiversité, l'économie, la sécurité et, plus généralement, la vie des êtres humains. Les projections des scientifiques à travers le monde mettent en évidence que les prochaines décennies seront critiques pour intervenir contre cette catastrophe planétaire.

Les changements climatiques sont causés par les activités humaines qui engendrent le rejet d'une grande quantité de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère chaque année. La principale solution à cet enjeu consiste à régler le problème à la source en prévoyant une stratégie pour la réduction de ces émissions. Il s'agit d'une crise planétaire et l'objectif est de réduire, le plus rapidement possible, les émissions à l'échelle du globe. Pour l'atteindre, chaque instance, à tous les niveaux, doit adopter cette même visée, autant les nations, les villes, les entreprises que les individus.

Peu importe l'entité concernée, la stratégie de réduction passe par une quantification des émissions dont elle est responsable ou sur lesquelles elle peut avoir un contrôle. Il faut d'abord identifier les différentes sources d'émissions, pour ensuite les quantifier et enfin prévoir des mesures de réduction efficaces. L'étape de la quantification permet de cerner les sources d'émissions les plus importantes. Aussi, chaque émission peut être atténuée plus ou moins facilement. La stratégie de réduction consiste donc à prioriser les sources ayant le plus grand potentiel de réduction et exigeant les efforts les moins grands.

Pour la personne qui désire améliorer son empreinte carbone, il lui est possible d'identifier une bonne partie de ses sources d'émissions par elle-même. L'identification de différentes mesures de réduction ne sera également pas un enjeu pour elle. En effet, la majorité des Québécois sont déjà sensibilisés à plusieurs solutions écoresponsables qui concernent autant leur mobilité, leur alimentation ou leurs autres habitudes de consommation. La difficulté se trouve dans la quantification des différentes émissions. Cette étape est la plus complexe et la moins accessible. Même en étant consciente de plusieurs solutions potentielles, sans une bonne quantification, elle ne saura pas identifier celles à prioriser et ne pourra donc malheureusement pas prévoir un plan de réduction efficace.

La quantification des GES est une procédure qui demande des connaissances scientifiques spécifiques. Même une personne dotée de certaines notions en environnement aura de la difficulté à bien exécuter cette étape pourtant essentielle. Certes, beaucoup d'informations pertinentes à ce propos se retrouvent sur le web, mais les risques d'erreur dans leur interprétation sont grands et souvent sous-estimés. Les spécialistes en environnement jouent donc un rôle clé dans l'information du public pour ce maillon faible du plan de réduction qu'est la quantification.

Les principales émissions d'un individu sont souvent reliées à son transport, son alimentation, son habitation et à ses choix de consommation en général. Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'habitation qui semble particulièrement difficile à analyser. En effet, le transport est souvent responsable d'une plus grande partie des émissions, mais son empreinte est toutefois plus facile à calculer. Concernant l'empreinte carbone individuelle, dans la plupart des cas, la localisation de l'habitation est l'aspect le plus important à considérer pour celle-ci, car elle détermine une grande partie des besoins de déplacement (Vivre en ville, 2017). Ce constat s'illustre par le fait que chez les Québécois, les émissions de GES reliées au transport sont à la fois les plus importantes en moyenne et les plus variables d'une personne à l'autre (Carboneutre, 2020).

L'habitation en soi possède une empreinte carbone qui résulte principalement de sa construction et de son utilisation. Plusieurs concepts écologiques de maison visent à réduire cette empreinte. Les solutions sont diverses et interviennent autant sur la forme et la taille de celle-ci que sur les choix des matériaux qui la constitueront et sur la sélection de systèmes plus efficaces. Celui qui veut améliorer son impact individuel songera possiblement à opter pour une construction plus écologique pour son habitation. Il sera alors curieux de connaître l'efficacité des différentes mesures qui s'offrent à lui. L'accessibilité à une quantification des émissions associées à ces concepts écologiques devient alors nécessaire.

Cet essai a pour but de quantifier les émissions de GES associées à une habitation typique unifamiliale québécoise et d'évaluer l'impact de l'intégration de différents concepts d'habitation écologique sur ces émissions en territoire québécois. L'intention derrière ce travail est vraiment d'informer le citoyen québécois sur l'impact climatique de différents choix de conceptions d'une nouvelle maison. Bien sûr, les choix d'habitation sont influencés par une multitude de facteurs et l'impact GES n'est que l'un d'entre eux, souvent peu considéré. Il peut toutefois intéresser le citoyen et c'est une information actuellement beaucoup moins accessible que le prix, notamment. Ce travail vise ainsi à améliorer l'accessibilité de cette information pour le public.

L'objectif général de l'essai est de : comparer l'impact, sur l'empreinte carbone, de l'intégration de différents concepts d'habitation écologique à une maison unifamiliale québécoise moyenne. Cette maison typique, de taille moyenne, de type bungalow et utilisant des matériaux communs, sert de modèle de référence. Les concepts d'habitation écologique sont intégrés à celles-ci afin d'en apprécier leur effet.

Les objectifs spécifiques sont : de définir les caractéristiques d'une maison unifamiliale moyenne québécoise; d'identifier les sources d'émissions de GES significatives associées à toutes les phases du cycle de vie de cette maison; de sélectionner des outils et une méthode adéquats pour la quantification; d'évaluer l'empreinte carbone totale annuelle de la maison; de comparer l'empreinte carbone à celles de maisons équivalentes, mais intégrant les différents concepts d'habitation écologique; et de déterminer si

ces différents concepts d'habitations écologiques ont un impact significatif sur l'empreinte carbone globale de la maison et de l'individu.

Les concepts reliés à l'habitation écologique qui sont analysés dans cet essai sont, en comparaison avec la maison de référence : une maison sans sous-sol; une maison plus petite, pour représenter le concept de la minimaison; une maison logeant plus d'habitants, pour représenter la collocation à plusieurs; une maison dont la durée de vie est prolongée; une maison dotée d'un niveau d'isolation supérieur; une maison dotée d'une étanchéité supérieure et d'une haute efficacité énergétique; l'utilisation de matériaux à plus faible empreinte carbone que les matériaux conventionnels; et l'amélioration des habitudes de consommation des habitants.

L'impact d'autres modifications de la maison de référence sont aussi évaluées, comme l'utilisation de panneaux solaires et le chauffage aux énergies fossiles.

Chacun de ces concepts est représenté par différentes modifications précises. Elles sont intégrées, individuellement ou de façon combinée au modèle de référence. L'empreinte carbone est ensuite évaluée en considérant l'ensemble du cycle de vie de l'habitation. Enfin, les résultats sont ramenés à l'individu en comparant les diminutions d'émissions potentielles avec l'empreinte carbone individuelle afin de mieux apprécier leur pertinence.

La méthode de quantification repose sur le concept de l'analyse du cycle de vie (ACV). L'ACV est la méthode rigoureuse la mieux adaptée pour quantifier les émissions associées à une maison (Bastien et Lacharité, 2010). Le logiciel d'Athena, Impact Estimator, dont l'utilisation est recommandée par le « Leadership in Energy and Environmental Design » (LEED), utilise cette approche et sert à modéliser les maisons de ce travail afin d'identifier leurs émissions intrinsèques (U.S. Green Building Council, 2020). Les émissions opérationnelles, soit celles qui sont associées à la consommation d'énergie pendant le fonctionnement de la maison, sont calculées parallèlement avec le logiciel de simulation énergétique HOT2000 développé par Ressources Naturelles Canada (RNCAN) (Canada, 2018).

Cette étude se base sur une grande variété de sources d'information. La méthode est justifiée selon des instances reconnues comme Athena et le Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG), qui sont des piliers de l'ACV en Amérique du Nord. Les facteurs d'émissions sont surtout tirés de la base de données même d'Impact Estimator et d'autres proviennent d'articles scientifiques ou de déclarations environnementales de produit (DEP) faites par des organisations d'accréditations environnementales comme UL Environment Inc. Des experts québécois en construction, en ACV de bâtiments ou inventaire GES ont été consultés pour obtenir diverses informations, notamment Construction Massawippi, CT Consultant, et Isabelle Audet. De grandes références québécoises en

environnement, comme Écohabitation et Équiterre, ont également fourni de l'information importante pour la réalisation de cette étude via leurs multiples publications. Des publications des gouvernements du Canada et du Québec ont, pour leur part, permis d'obtenir des statistiques utiles. C'est la variété, mais surtout la crédibilité de ces sources qui permettent d'assurer la qualité de ce travail.

Cet essai débute en mettant de l'avant le contexte actuel des changements climatiques et l'importance pour les humains de réduire leurs émissions de GES. Il s'en suit une comparaison des différentes méthodes de quantifications puis une description de l'analyse de cycle de vie utilisée pour quantifier les GES d'une habitation. La méthodologie est ensuite décrite et expose d'abord l'approche générale appliquée à ce travail. Elle présente de façon détaillée la maison de référence avec l'ensemble de ses caractéristiques, les logiciels qui sont utilisés pour modéliser les émissions intrinsèques et opérationnelles de cette maison et comment les résultats sont compilés. Le chapitre suivant commente les résultats de l'analyse de la maison de référence. Ensuite, les modifications écologiques sont intégrées, justifiées, décrites, modélisées et le résultat est analysé. Les combinaisons de modifications sont aussi présentées et analysées dans un autre temps. L'ensemble des résultats est ensuite compilé dans une section qui les synthétise et les commente. Enfin, des recommandations sont faites et une discussion fait un retour sur l'ensemble du travail avant de conclure.

## 1 MISE EN CONTEXTE

La lutte aux changements climatiques préoccupe de plus en plus les citoyens. L'être humain émet via ses activités une grande quantité de GES dans l'atmosphère, ce qui entraîne une augmentation de la température globale. Les sources d'émissions sont multiples et les moyens pour les réduire le sont d'autant plus. Autant au niveau du gouvernement que de l'individu, on se questionne sur la pertinence des différentes mesures de réduction envisageables. Avec un budget de temps et d'argent limité, il faut prioriser et mettre les efforts où l'impact est significatif.

Pour le citoyen, des exemples d'initiatives sont : opter pour une voiture électrique ou prioriser le transport en commun, choisir une alimentation végétarienne ou biologique, éviter de prendre l'avion, simplement tenter de sensibiliser son entourage, etc. La liste de propositions soi-disant écologiques est presque interminable. La faisabilité de chacune de ces solutions dépend bien sûr de la réalité de l'individu. Ce qui est certain, c'est qu'il n'est pas possible d'effectuer tous ces changements de mode de vie, car ils impliquent généralement un effort ou un sacrifice plus ou moins grand. Si la motivation derrière ces initiatives est vraiment de réduire son empreinte environnementale, on voudra maximiser son impact par rapport aux efforts à fournir. Afin de pouvoir ainsi prioriser, il faut d'abord être en mesure de quantifier les impacts de chaque geste et c'est ici que réside le plus grand défi.

Les problèmes environnementaux sont multiples : la pollution de l'air, de l'eau, des sols, la déplétion de la couche d'ozone, le plastique dans l'environnement, la perte de biodiversité, la déforestation, etc. La lutte pour la préservation de l'environnement se fait sur tous les fronts et il est important de mesurer l'impact des activités humaines sur chacun de ces aspects. Les changements climatiques sont cependant vraiment au cœur du défi environnemental d'aujourd'hui et cela pour plusieurs raisons. D'abord, il s'agit d'un problème d'une grande urgence. Les actions d'aujourd'hui affectent les conditions environnementales des prochaines décennies et plus on attendra, plus les impacts seront sévères. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) estime qu'un point de basculement du climat pourrait survenir à aussi peu qu'un ou deux degrés Celsius (°C) d'augmentation de la température globale (Lenton et al., 2019). Il s'agit d'un seuil où le climat pourrait soudainement changer entre deux états relativement stables (NASA, s. d.). C'est une situation à éviter à tout prix, car des impacts pourraient être irréversibles. Ensuite, les changements climatiques sont interreliés avec plusieurs autres enjeux environnementaux. La déforestation, le gaspillage alimentaire, la fonte des glaciers et la perte de biodiversité sont tous des exemples de causes et souvent aussi d'effets des changements climatiques (Earth.org, 2020). Finalement, ce dérèglement climatique a de nombreux impacts sur les humains. Le renommé naturaliste David Attenborough qualifie les changements climatiques comme étant le « *biggest threat to security that modern humans have ever faced* » (Independent, 2021). Ils engendrent directement ou indirectement des catastrophes naturelles plus fréquentes et plus violentes, des sécheresses, une augmentation du niveau



des mers, des problèmes d'accès à l'eau et des pénuries alimentaires, pour ne nommer que ces problèmes-là (Jackson, s. d.). Barack Obama disait dans le film *Before the Flood* :

*« A huge proportion of the world's population lives near oceans. If they start moving, then you start seeing scarce resources are subject to competition between populations. This is the reason the Pentagon has said this is a national security issue. »* (Carbon Brief, 2016)

Ce genre de discours illustre que les conséquences s'étendent au-delà des impacts directs qui pourraient parfois sembler moins cibler le peuple québécois. L'ex-président des États-Unis explique que la rareté des ressources, causée par les changements climatiques, rend les populations sujettes à entrer en compétition et sous-entend ainsi des risques de conflits militaires.

La cause principale du réchauffement climatique est l'augmentation de l'effet de serre atmosphérique, qui résulte de la hausse des émissions de GES découlant des activités humaines (Nasa, 2021). Pour cette raison, on mesure souvent l'impact d'une activité humaine en émissions de GES. Le GES principal est le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), mais plusieurs autres gaz sont en causes comme le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Ces derniers ont un potentiel de réchauffement planétaire (PRP) plus puissant que le  $\text{CO}_2$ . À des fins pratiques, ils sont tous considérés ensemble et présentés en  $\text{CO}_2$  équivalent ( $\text{CO}_2\text{eq}$ ). Le terme PRP est aussi utilisé pour caractériser les émissions de GES d'un produit en  $\text{CO}_2\text{eq}$ . Cette métrique ne considère pas tous les facteurs de forçage radiatif et exclu notamment l'albédo (Myhre et al., 2013)

Les grands responsables des émissions de GES sont bien connus : le transport, l'agriculture, le bâtiment, l'électricité, le chauffage, les industries, etc. La proportion attribuable à chacun d'entre eux varie d'un pays à l'autre. Cette méthode de classification par secteur est couramment utilisée pour segmenter les sources d'émissions d'une population. Elle donne une idée globale pour une nation, mais ne permet pas toujours de tirer des conclusions pertinentes pour l'individu, car plusieurs activités peuvent s'inscrire dans une catégorie ou une autre. Par exemple, l'inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre attribue 10.3% des émissions québécoises au secteur du résidentiel, commercial et institutionnel pour l'année 2017. Cependant, cette donnée inclut presque exclusivement le chauffage, puisque la construction des bâtisses est comptée dans le secteur industriel et l'électricité est aussi considérée à part (MELCC, 2019). On peut classer les émissions de façon plus adaptée pour représenter le bouquet d'émissions du citoyen et la place qu'occupe l'habitation dans celui-ci. Les sources d'émissions associées au mode vie d'une personne et à son habitation sont variées et complexes à décortiquer et à quantifier. La compréhension des méthodes de quantification est donc importante pour l'atteinte des objectifs de ce travail.

## **2 MÉTHODES DE QUANTIFICATIONS ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE**

Afin d'assurer la validité des résultats de ce travail, il faut d'abord comparer les méthodes de quantification et sélectionner l'approche la plus adéquate. Il existe différents moyens d'évaluer l'empreinte carbone et certaines méthodes sont plus appropriées selon le besoin ou l'ampleur du système. Le système est un terme général qui représente ce que l'on veut analyser, ce peut être un pays, une ville, un procédé, un bâtiment, un organisme ou une compagnie, un individu ou un produit. On n'utilisera pas la même méthode par exemple pour calculer une empreinte individuelle ou celle d'une nation entière.

Ce projet vise principalement à quantifier les émissions de GES d'une maison. Toutefois, il consiste également à mesurer la proportion que prennent ces émissions dans l'empreinte globale d'un individu. Un sous-objectif est donc d'identifier les émissions annuelles totales du québécois moyen et d'examiner comment elles se divisent entre les différentes sphères de sa vie. Il est aussi souhaité de comparer les résultats avec ceux issus d'autres études et d'évaluer comment ils se comparent d'une réalité géographique à l'autre. Dans chacun de ces cas, il faut porter attention à la méthode utilisée.

La principale différence entre les méthodes de quantification réside dans ce qui est inclus ou exclu du calcul. Elles ne prennent pas en compte les mêmes émissions et mènent ainsi à différents résultats qui ne peuvent être comparés. Pour que la comparaison des émissions de la maison avec celles de l'individu soit valide, il faut s'assurer qu'elles soient quantifiées via la même méthode. La même consigne s'applique pour la comparaison des résultats de cette étude avec ceux d'autres études.

Avant d'analyser les différentes méthodes de quantification, il est important de distinguer deux types d'émissions, celles qui sont directes et celles qui sont indirectes. Les émissions directes consistent en des rejets de GES dont la source est le système à l'étude même, c'est le cas des émissions de combustion d'un système de chauffage au gaz naturel par exemple. Les émissions indirectes, pour leur part, sont émises à l'extérieur du système, mais sont tout de même considérées comme le résultat de l'existence de celui-ci. Par exemple, la production de béton émet des GES. Ce sont des émissions directes pour le fabricant de béton. D'un autre côté, si la construction d'une maison en utilise, elle engendre une demande pour la production de ce béton. Il est alors possible de vouloir inclure les émissions associées à la production du matériau dans le bilan carbone de cette maison. Ce même impact carbone pourrait donc être attribué à deux systèmes, celui du producteur et celui de l'utilisateur.

### **2.1 L'empreinte des Québécois et les aspects importants en quantification**

Lorsque l'empreinte moyenne des Québécois ou des Canadiens est évaluée, ce sont souvent les émissions totales du territoire qui sont divisées par le nombre d'habitants. L'Inventaire québécois des émissions de GES indique qu'en 2018, le Québec avait produit 80,6 mégatonnes de CO<sub>2</sub>eq (MtCO<sub>2</sub>eq), soit 9,6 tonnes de CO<sub>2</sub>eq (tCO<sub>2</sub>eq) par habitant (MELCC, 2020). Ce calcul est typiquement utilisé pour comparer les

nations entre elles. Le tableau 2.1 compare les émissions totales ainsi que celles par habitant de quelques-uns des pays les plus pollueurs (Union of Concerned Scientists, 2020). Ce tableau indique que la Chine est le pays le plus émetteur au monde avec 10,06 gigatonnes de CO<sub>2</sub>eq (GtCO<sub>2</sub>eq), soit presque le double des États-Unis qui occupe le deuxième rang. Cependant, lorsque ce sont les rejets de GES par habitant qui sont évalués, les États-Unis émettent deux fois plus que les Chinois. On voit que le Canada se classe 5<sup>e</sup> sous cette métrique et si le Québec se comparait à ces pays, il se classerait pour sa part au 8<sup>e</sup> rang.

**Tableau 2.1 Émissions annuelles totales et par habitant de divers pays** (inspiré de : Union of Concerned Scientists, 2020).

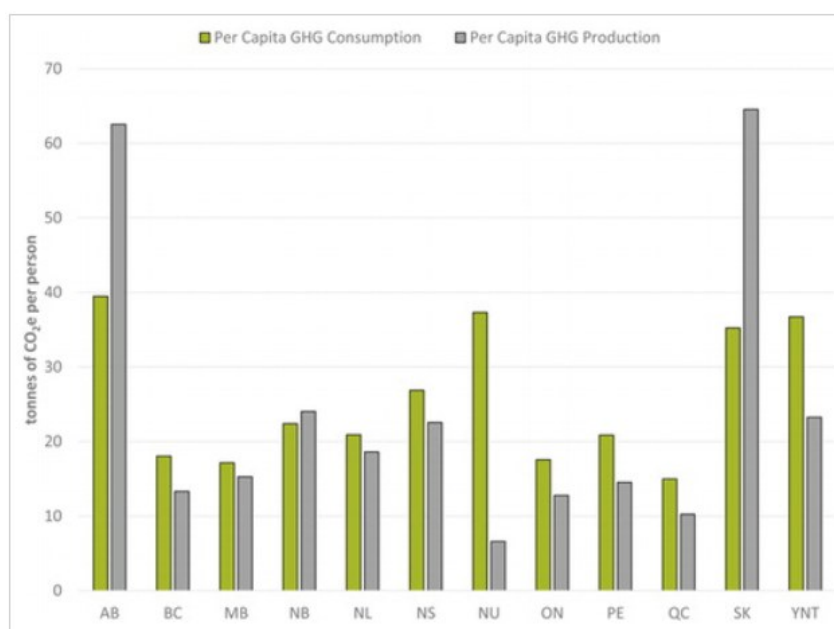
<i>Pays</i>	<i>Émissions totales</i>		<i>Émissions par habitant</i>	
	<b>Rang</b>	<b>GtCO<sub>2</sub>eq</b>	<b>Rang*</b>	<b>tCO<sub>2</sub>eq/h</b>
Chine	1	10,06	13	7,05
États-Unis	2	5,41	4	16,56
Inde	3	2,65	21	1,96
Arabie saoudite	9	0,46	1	18,48
Canada	11	0,47	5	15,32
France	19	0,33	14	5,19
Québec	-	-	8	10,00
*Rang parmi les 21 pays les plus pollueurs				

Cet exemple introduit bien la notion de responsabilité et l'importance de la rigueur dans l'interprétation de données. D'un point de vue, on pourrait attribuer à la Chine le titre du plus grand contributeur aux changements climatiques. Les petits pays européens, pour leur part, ont fière allure, mais si l'Europe était considérée comme un seul pays, il aurait sûrement la pire cote au niveau des émissions totales, car il faudrait additionner les émissions de tous ses pays. La Chine a donc effectivement un grand poids dans les émissions mondiales avec près de 20% de la population mondiale qui y réside, mais il s'avère plus sensé d'évaluer l'efficacité écologique d'un pays en considérant le nombre d'habitant.

Il est important de noter que cette méthode attribue aux différentes nations les GES qui sont émis sur leur territoire. Il s'agit donc seulement ici d'émissions directes. Avec la mondialisation et tous les échanges qu'elle implique entre les pays, le lieu de l'émission n'indique toutefois pas nécessairement le responsable de celle-ci. Une grande quantité des biens produits en Chine sont exportés vers des utilisateurs ailleurs dans le monde et ces derniers ont certainement une grande part de responsabilité dans les pollutions que cette production implique. De plus, le paysan chinois n'a pas de contrôle sur les émissions des grandes industries sur son territoire, contrairement aux consommateurs des produits qu'elles génèrent.

La comptabilité des GES basée sur la consommation est une alternative à la comptabilité territoriale (CIRAIG, 2015). Elle consiste à soustraire aux émissions totales d'un pays celles qui sont associées aux exportations et à additionner celles associées aux importations. De cette façon, on représente mieux les

impacts des habitudes de consommations d'une population qui sont reliées à leur mode de vie. Comme montré sur la figure 2.1, illustrant des données de 2011 de l'Université de Calgary, les Québécois seraient plutôt responsables, non pas de 10 tCO<sub>2</sub>eq, mais de 15 tCO<sub>2</sub>eq en moyenne annuellement, lorsque c'est leur consommation qui est considéré (Fellows et Dobson, 2017). C'est d'ailleurs cette dernière valeur qui est utilisée dans le cadre de ce travail pour considérer l'empreinte individuelle moyenne du citoyen québécois.



**Figure 2.1 Empreintes GES par habitant basées sur la consommation et sur la production pour les provinces canadiennes** (tiré de : Fellows et Dobson, 2017).

La comptabilisation territoriale des GES se concentre donc sur les émissions directes et celle basée sur la consommation prend en compte les émissions associées à l'utilisateur, qui sont autant directes qu'indirectes. Il s'agit de deux méthodes qui donnent des résultats bien différents pour un même indicateur : les émissions par individu.

Cet exemple illustre l'importance d'être vigilant lors de l'utilisation de données issues de différentes sources. Le contexte dans lequel s'inscrit la donnée est élémentaire, mais souvent facile à négliger.

Dans le cas de ce calcul, il y aurait d'autres aspects à garder en tête dans son interprétation. La moyenne québécoise d'émission inclut tous les groupes d'âge et toutes les classes sociales. On sait notamment que la population québécoise est composée de 5% d'enfants de moins de 5 ans qui n'ont certainement pas le même impact carbone que les adultes (Famille Québec, 2021). Il est donc toujours un peu discutable de se comparer ainsi à des moyennes.

Lorsqu'on évalue une empreinte carbone individuelle, c'est généralement une approche qui s'apparente à la comptabilisation basée sur la consommation qui est utilisée. Pour un individu, une grande partie de son empreinte écologique est indirecte. Ses émissions directes se limitent sensiblement aux combustibles brûlés dans sa voiture, pour le chauffage ou lorsqu'il prend l'avion. Ses émissions indirectes sont associées à tous les produits qu'il consomme, incluant son alimentation et d'autres biens matériels, mais aussi à différents services, comme la gestion de ses déchets et les données internet qu'il utilise, pour ne donner que quelques exemples. Tous ces aspects sont généralement considérés par les différents calculateurs d'empreinte écologique personnelle disponible sur le web, comme celui de la World Wildlife Fund (WWF) (WWF, s. d.). On mesure donc avec ceux-ci les émissions causées directement ou indirectement par ses habitudes de consommation et par son mode de vie. Ces références donnent des approximations à leurs utilisateurs, mais ne fournissent pas de statistiques ou de moyennes pour le Québec. La valeur de 15 tCO<sub>2</sub>eq/a reste donc la meilleure estimation d'une empreinte individuelle québécoise disponible.

## **2.2 Empreinte des habitations québécoises**

Selon le site carboneutre, environ 12% de l'empreinte carbone du québécois est issue des bâtiments (construction, chauffage, climatisation et électricité), 38% proviennent des transports et 50% du reste. Il est à noter que le 12% attribué aux bâtiments inclut la résidence, mais aussi tous autres bâtiments tels les commerces, entreprises et édifices publics. Ces valeurs sont cependant approximatives et surtout très variables selon le mode de vie. Un citoyen aura généralement une bien plus faible empreinte carbone qu'un habitant de banlieue ou de région, puisqu'il réduit de beaucoup ses besoins en transport et aura typiquement une plus petite habitation. (Carboneutre, 2020). Selon les données de l'université de Calgary, l'addition des émissions du chauffage et de la construction résidentielle correspondrait à 10% des émissions québécoises basées sur la consommation (Fellows et Dobson, 2017). En divisant les totaux provinciaux par les 7,9 millions d'habitants québécois de cette année, on estime en moyenne par personne un total d'environ 15,2 tCO<sub>2</sub>eq, dont 0,71 tCO<sub>2</sub>eq pour le chauffage des maisons, 0,81 tCO<sub>2</sub>eq pour leur construction.

Il demeure peu pertinent d'identifier une valeur moyenne pour représenter tous les Québécois étant donné la grande variabilité. Il est raisonnable d'estimer cependant que, pour des habitants d'une maison unifamiliale, les plus importants contributeurs au GES seront d'abord le transport et ensuite l'alimentation. En effet, le CIRAIG évalue que l'assiette québécoise est responsable en moyenne de 2540 kilogrammes de CO<sub>2</sub>eq par année (kgCO<sub>2</sub>eq/a) (Dirat, 2020). La maison ne contribue pas avec la même importance, mais elle reste considérable. On peut estimer que l'habitation représente tout de même entre 5% et 15% des émissions, soit environ de  $1,5 \pm 0,75$  tCO<sub>2</sub>eq par personne.

Les émissions de GES attribuables à une maison peuvent se diviser en deux grandes catégories : les émissions reliées à sa fabrication et celles issues de son utilisation. Pour la première catégorie, on parlera

principalement de carbone dit intrinsèque aux matériaux, soit la somme des GES émis durant chacune des étapes du cycle de vie d'un produit. Chaque matériau utilisé pour la fabrication d'une maison possède sa propre empreinte carbone. C'est l'addition de l'ensemble de ces empreintes ainsi que les émissions associées aux processus de construction et de déconstruction de la maison qui sont regroupées dans cette partie. La deuxième catégorie se limite aux émissions opérationnelles de la maison qui représentent celles issues du chauffage et de l'électricité consommée. Dans le cas d'une maison chauffée entièrement à l'électricité, il ne s'agit que de quantifier les émissions associées à la production de l'électricité qu'elle utilise.

Selon une étude publiée par Écohabitation, les émissions associées à une maison conventionnelle au Québec sont généralement issues à parts égales du chauffage et de l'énergie intrinsèque des matériaux (Mignot et Duchaine, 2020). Le contexte québécois, avec son hydroélectricité qui est abondante, est presque unique au monde. Ailleurs dans le monde, la proportion des émissions attribuées au chauffage est souvent beaucoup plus grande puisqu'elle dépend généralement des énergies fossiles (Écohabitation, 2020b).

## **2.3 Méthodes de quantifications**

Différents guides et standards ont été développés afin d'aider les organisations à comptabiliser leurs GES de façon crédible et comparable. Le choix approprié de l'outil à suivre dépend du besoin et de la nature du projet. (Pre-Sustainability, 2012)

Les organismes, les entreprises et les municipalités qui désirent mesurer leurs impacts environnementaux vont généralement passer par ce qu'on appelle un inventaire GES. L'inventaire GES est régulé par la série de normes internationale ISO 14064 qui est spécifiquement conçue pour la comptabilisation au niveau des projets ou au niveau organisationnel (International Organization for Standardization, s. d.). La procédure exige la comptabilisation des émissions directes et des émissions indirectes associées à l'utilisation d'énergie. Les autres émissions indirectes peuvent être ou ne pas être comptabilisées dépendamment de l'objectif ou de la portée du projet, mais la majorité de celles-ci sont généralement omises. Une usine qui désire améliorer son bilan carbone, par exemple, va se concentrer sur ses émissions directes reliées notamment à ses procédés ou à son transport, mais ne considérera pas nécessairement le carbone intrinsèque des matériaux qu'elle utilise. Cette démarche demande de considérer les émissions qui sont sous le contrôle (opérationnel ou financier) de l'entreprise.

En comptabilisant seulement les émissions directes, une forme de double comptage est éliminée. Cette méthode est donc appréciée d'un gouvernement qui désire compiler les impacts de chacune des industries sur son territoire.

La norme ISO 14044 est la référence principale pour évaluer l'empreinte carbone d'un produit et utilise l'approche de l'analyse du cycle de vie (ACV). L'ACV est une méthode qui évalue les différents impacts environnementaux d'un produit en tenant compte de l'ensemble des étapes de son cycle de vie, de l'extraction de la matière première à la fin de vie (CIRAIG, s. d.-b). Elle comptabilise, mais ne se limite pas à, l'empreinte carbone et assure l'inclusion de toutes les émissions directes et indirectes. L'ACV serait souvent trop fastidieuse pour faire l'inventaire carbone d'une organisation ou d'un projet complexe. Toutefois, elle a l'avantage de mesurer les impacts considérant des frontières plus larges et permet ainsi d'obtenir un portrait plus réaliste, ce qui est approprié pour un produit. La méthode possède ses limites, entre autres à cause du manque de disponibilité de certaines données et de l'utilisation fréquente de moyennes de l'industrie ne représentant pas nécessairement la réalité (Malin, 2005). L'incertitude et les risques de biais sont grands. La rigueur et la prudence sont donc requises dans l'interprétation des résultats. L'approche de l'ACV reste préférée pour l'évaluation de l'empreinte carbone d'une maison, car une grande proportion de ses émissions est intrinsèque à ses matériaux.

## 2.4 Étapes de réalisation de l'ACV

Les principales étapes à suivre dans la réalisation d'une ACV sont les suivantes :

- Identification du but et de la portée de l'analyse
- Analyse d'inventaire
- Analyse d'impact
- Interprétation des résultats

L'ACV est un processus itératif et chaque étape peut être retravaillée en fonction du résultat de celle qui la précède ou qui la suit. L'interprétation se fait en considérant chacune des trois premières étapes. La figure 2.2 schématise ce processus.

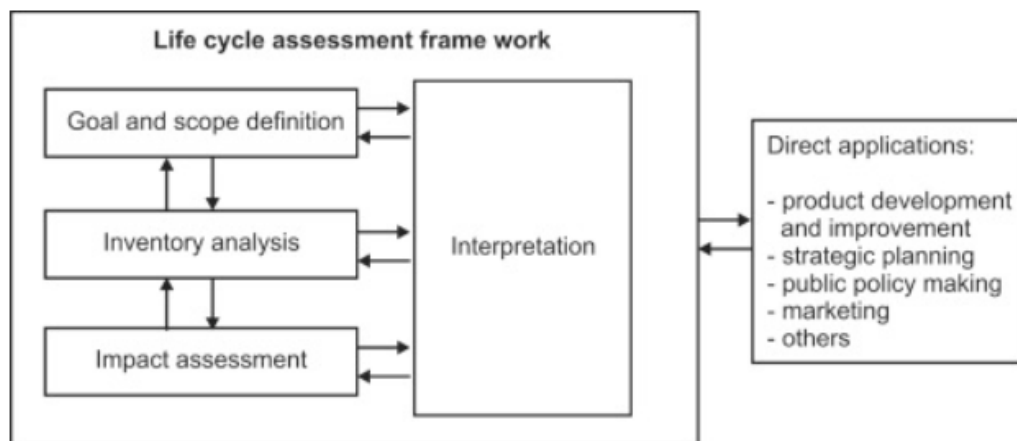


Figure 2.2 Étapes de la réalisation de l'ACV (tiré de : Muralikrishna et Manickam, 2017)

## 2.5 Étapes du cycle de vie

Le cycle de vie d'un produit inclut différentes étapes distinctives, souvent regroupées en grandes catégories. On retrouve généralement l'acquisition des matières premières, la transformation en produit, la distribution jusqu'à l'utilisateur, l'utilisation et la fin de vie. Si le produit est recyclé, on peut inclure cette étape supplémentaire et fermer la boucle, comme représenté à la figure 2.3.

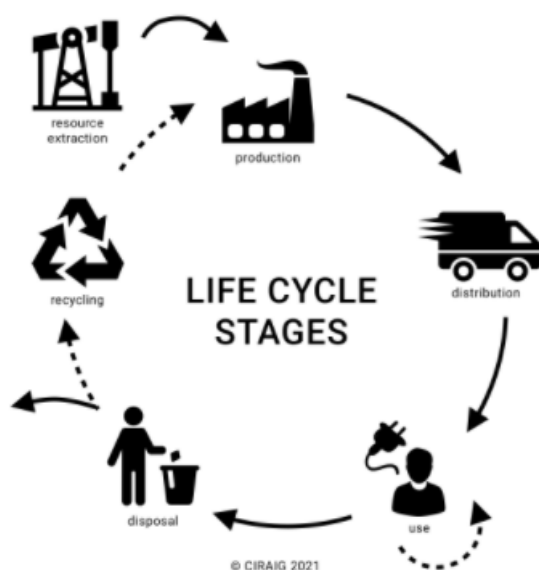


Figure 2.3 Étapes du cycle de vie (tiré de : CIRAIG, s. d.-a)

Dans certains cas, des analyses partielles du cycle de vie sont préférées. On utilise le terme « du berceau à la porte », une traduction de l'anglais « *cradle to gate* », pour désigner une ACV partielle qui n'inclue que l'extraction des ressources et la fabrication du produit. L'ACV dite du berceau au tombeau (*cradle to grave*) quantifiera pour sa part les émissions de la première étape jusqu'à la fin de vie.

## 2.6 ACV du bâtiment

Tel qu'expliqué jusqu'à maintenant, le processus de l'ACV s'applique généralement à un produit. Un bâtiment consiste en un assemblage d'une multitude de produits et on l'étudie de la même façon en plus d'y inclure la somme des ACV de toutes ses composantes. Cela implique que, avant de procéder à l'ACV d'une maison, il faut préalablement avoir fait l'ACV de tous les matériaux qui la composent. Sans le précieux travail déjà effectué sur les produits composant la maison, il ne serait pas possible de procéder à l'étude. Heureusement, plusieurs données sont disponibles à ce jour et sont présentées dans des DEP. La DEP est un document résumant les résultats d'une ACV faite pour un produit, conformément au protocole ISO 14025 (Voirvert, s. d.). Elle décrit les impacts environnementaux de ce produit, dont le PRP. La DEP est généralement produite par une instance externe et spécialisée. Elle utilise les données d'émissions de



plusieurs compagnies fabricant un produit équivalent sur un territoire donné et présente des valeurs moyennes pour l'industrie. Les DEP se trouvent souvent dans des répertoires comme le SM Transparency Catalog qui en rassemble une grande quantité pour des produits nord-américains de plus de 1500 entreprises (Sustainable Minds, s. d.). Dans certains cas, les PRP peuvent aussi être tirés d'articles scientifiques. Les différents PRP utilisés pour ce travail sont présentés au chapitre de la méthodologie.

L'ACV des bâtiments est une pratique commune. Un système particulier de division des étapes du cycle de vie est d'ailleurs couramment utilisé dans le monde de la construction pour les bâtiments et pour les matériaux qui les composent.

Voici les grandes étapes du cycle de vie appliquées à un bâtiment :

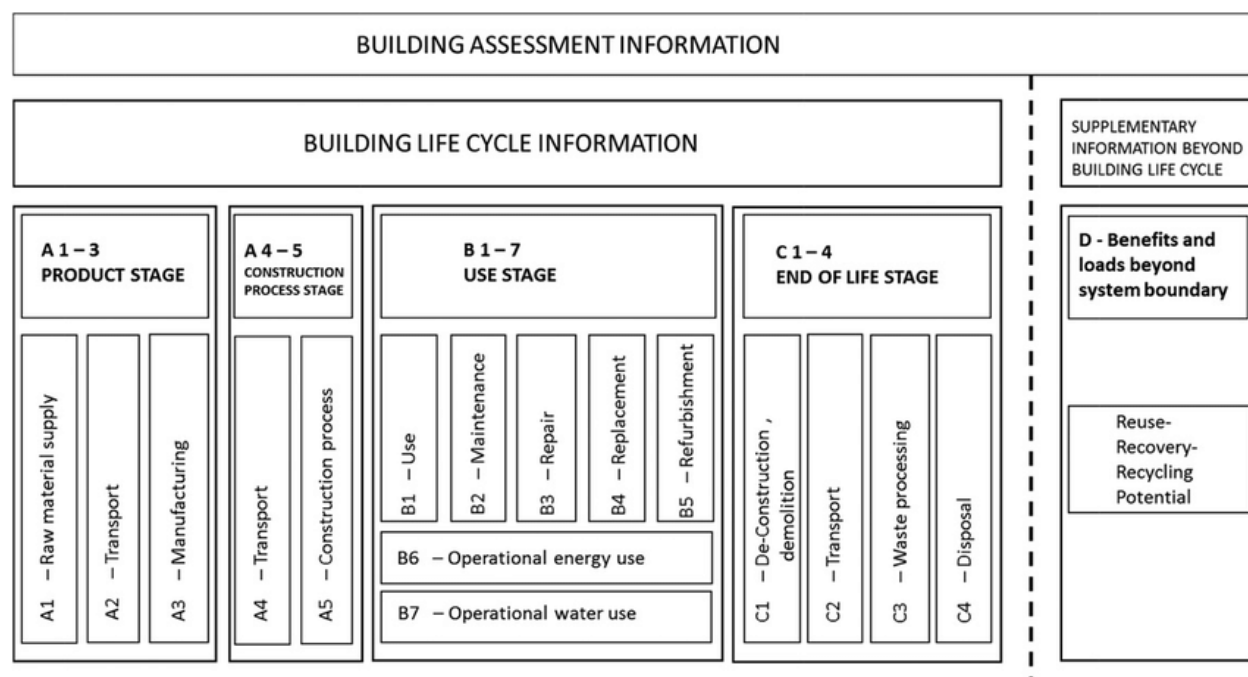
A = Production et procédés de construction

B = Utilisation

C = Fin de vie

D = Au-delà de la fin de vie

La figure 2.4 montre en détail ces quatre grandes étapes ainsi que leurs sous-étapes.



**Figure 2.4 Étapes et sous-étapes de l'ACV d'un bâtiment** (tiré de : Hafner et Rüter, 2018, p.142)

L'étape A est généralement la plus importante en termes de GES et elle est divisée en deux sous-sections. La première, de A1 à A3, comprend l'extraction des matières premières, le transport de celles-ci et la fabrication des produits. On l'appelle l'étape du produit et elle représente la portion *cradle to gate* pour tous les matériaux qui composent la maison. La sous-catégorie A4-A5 implique le transport des produits finis

vers le chantier de construction et leur installation. L'étape B comptabilise toutes les émissions qui ont lieu durant la vie de la maison. On considère dans cette catégorie les remplacements faits lors de rénovations tout au long de la vie de celle-ci. Si par exemple la durée de vie de la maison est de 60 ans et que les portes sont changées à mi-parcours, les émissions associées aux portes installées initialement seront comptées à l'étape A et les celles pour les portes de remplacement à l'étape B. Cette étape inclut aussi les GES causés par le chauffage et la consommation d'électricité. La fin de vie (C) implique les impacts de la déconstruction de la maison et du transport, de la disposition et de la gestion des rebuts de construction.

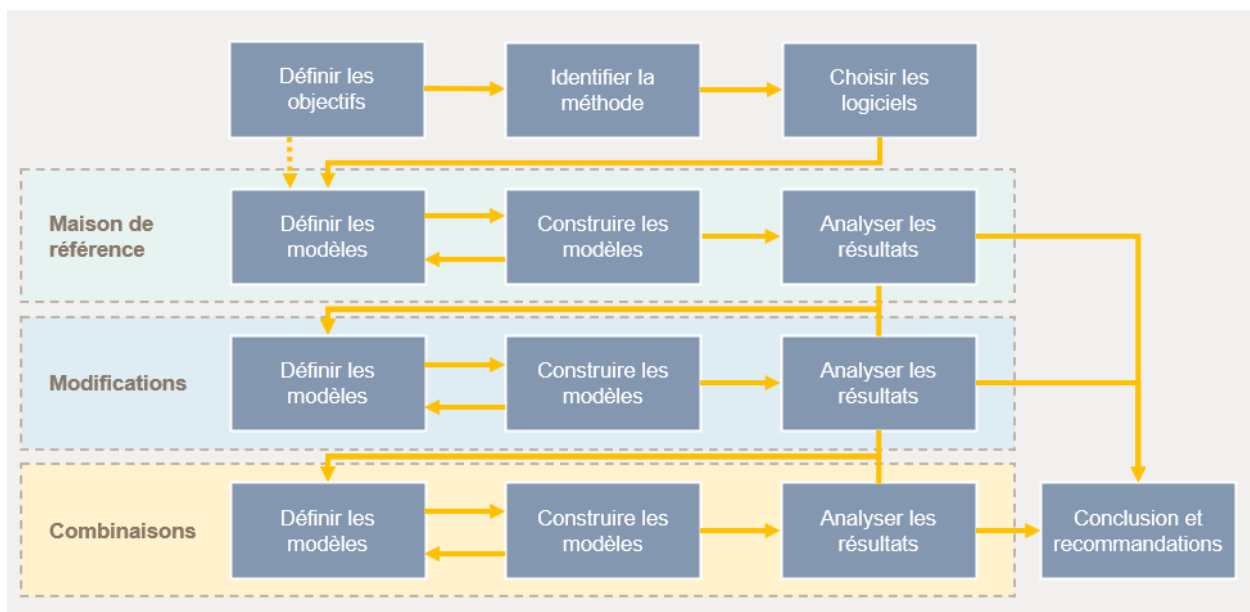
Une quatrième et dernière étape est celle qui considère « l'au-delà » de la fin de vie (D). Il s'agit en fait d'une étape supplémentaire qui tente de tenir compte des potentiels d'économie de GES qui pourraient être générés par la réutilisation des produits en fin de vie, leur recyclage et par la substitution d'énergie. On peut observer sur la figure 2.4 que l'étape D a été mise à part du reste par Hafner et Rüter (2018). En ACV, elle n'est généralement pas considérée. En effet, LEED spécifie de ne pas inclure cette étape qui se trouve en dehors des frontières du cycle de vie du projet étudié (Thibodeau, 2020). L'organisme Équiterre a aussi jugé que le logiciel de modélisation utilisé, Impact Estimator (IE), donnait des résultats disproportionnés pour ce module et a donc décidé de ne pas l'inclure dans son analyse de la Maison du développement durable (Thode, 2017). L'étude sur l'Éco-Habitat S1600, publiée par Écohabitation, utilise aussi IE et a, pour sa part, vraisemblablement inclus l'étape D dans ses calculs puisqu'on observe que les murs de la maison entraînent des émissions négatives (Mignot et Duchaine, 2020). Le logiciel IE de l'institut Athena est aussi celui qui est utilisé pour cet essai et il est présenté au prochain chapitre.

L'étape D peut s'avérer intéressante à évaluer dans les discussions, car elle peut avoir un impact significatif sur les résultats. Par exemple, le bois qui est récupéré lors de la déconstruction peut servir à substituer un carburant fossile dans un autre projet. Cette substitution sera cependant sans doute représentée dans le bilan GES de cet autre projet. Il y aurait ainsi un double comptage de l'empreinte écologique si les réductions d'émissions sont considérées dans les deux projets. Il devient alors difficile d'identifier un unique responsable de cette économie. Une grande vigilance est alors à préconiser lors de l'interprétation de cette dernière étape.

Dans le cadre de cette étude, il a été décidé de suivre autant que possible la méthode la plus largement utilisée par l'industrie et d'exclure la phase de l'après-vie.

### 3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente l'ensemble de la méthode utilisée pour la réalisation de ce travail. Comme expliqué précédemment, l'analyse du cycle de vie est un processus itératif. Les choix des concepts écologiques d'habitation à évaluer ne peuvent être totalement définis avant d'obtenir certains résultats. La figure 3.1 illustre le processus itératif employé pour ce projet.



**Figure 3.1** Diagramme illustrant le processus itératif d'ACV pour ce projet

Une fois les objectifs du projet et la méthode de quantification identifiés, il faut déterminer les logiciels de modélisation qui seront utilisés pour effectuer le travail. La maison de référence peut déjà être partiellement définie à cette étape, mais elle se définira davantage en commençant la modélisation et en découvrant les limites des logiciels. Cette partie demande plusieurs itérations puisqu'il y a beaucoup de caractéristiques à définir sur le premier modèle. Dès la maison de référence complètement définie et modélisée, l'analyse de ses résultats aide à déterminer les modifications individuelles qui seront pertinentes et possibles à évaluer. Encore une fois, la définition exacte de ces modifications se concrétise lors de la modélisation. À mesure que les résultats de celles-ci se révèlent, de nouvelles modifications sont ajoutées à la liste et certaines sont finalement rejetées. Lors de l'obtention des résultats pour toutes les modifications individuelles, les combinaisons de modifications les plus intéressantes peuvent être identifiées. Le même processus itératif s'applique pour l'étape des combinaisons. L'analyse des derniers résultats pourrait même révéler la pertinence d'ajouter certaines modifications à l'étude. Finalement, les contraintes de temps du projet forcent à sortir de la boucle et à tirer des conclusions et recommandations avec l'ensemble des résultats obtenus.

Ce chapitre présente et justifie d'abord les caractéristiques de la maison de référence. Il explique ensuite le choix des logiciels utilisés, ainsi que leur fonctionnement, pour modéliser les émissions intrinsèques puis

opérationnelles. Une étape de post-traitement et de compilation des résultats est aussi décrite. Cette démarche de modélisation et de quantification s'applique à tous les modèles étudiés dans le cadre de ce travail.

La présentation des concepts écologiques sélectionnés et évalués n'est faite qu'après avoir analysé les résultats de la maison de référence, dans les chapitres suivants. Les résultats des analyses sont donc présentés au fil du travail, suivant le processus itératif de la méthode. L'ensemble des résultats est toutefois résumé et analysé dans un chapitre subséquent avant de fournir des recommandations et de conclure.

### **3.1 Maison de référence**

La première étape de ce travail consiste à définir un modèle de maison de référence. Il s'agit de la maison qui sert de barème et sur laquelle des concepts écologiques sont intégrés pour des fins de comparaison. Étant donné la grande variabilité dans les types et tailles d'habitation au Québec, il n'est évidemment pas possible de représenter chacune d'entre elles. Le but est de se rapprocher de la réalité du plus grand nombre de Québécois prévoyant l'achat ou la construction d'une nouvelle maison unifamiliale. Ainsi, des recherches sont effectuées afin d'identifier les pratiques les plus courantes à ce jour, au Québec. Plusieurs caractéristiques sont définies telles que la taille de la maison, le nombre d'étages, les matériaux utilisés et la présence ou non d'un sous-sol.

#### **3.1.1 Les sources d'information**

La définition de la maison de référence se base sur une grande variété de sources d'information. La quantité de caractéristiques et de détails à définir est colossale et demande un grand travail de recherche. Cette section explique sur quelle base les divers choix de conception ont été faits.

Le contremaître d'expérience de l'entreprise Construction Massawippi, Alain Thibault, est la principale référence pour la définition des caractéristiques typiques d'une maison québécoise. La consultation de cet expert a permis de cerner plusieurs paramètres généraux. Des plans de maison fournis par celui-ci servent également à définir les détails plus précis d'une construction classique. Le Code de construction du Québec (CCQ) est aussi une référence fort utile. Elle soumet les nouvelles constructions à plusieurs requis et la majorité des maisons doivent les respecter minimalement.

Le modèle de référence est également inspiré d'une maison existante pour la configuration des pièces et pour le nombre et le positionnement des portes et fenêtres. Un aperçu de cette maison est montré à la figure 3.2.



**Figure 3.2 Maison existante servant d'inspiration** (tiré de : Google, 2020)

Une grande variété de sources supplémentaires est utilisée pour compléter les informations manquantes, principalement des sites Internet portant sur la construction de maison au Québec. Évidemment, une quantité de choix arbitraires ont dû également être faits pour des détails de moindre importance. Souvent, des sélections sont faites par défaut dans les logiciels de modélisation, ce qui peut aider pour ce genre de choix. Certaines décisions sont aussi prises pour simplifier la modélisation. Par exemple, il a été décidé d'uniformiser les modèles de fenêtre, même si une maison en possède souvent une certaine variété. D'autres choix sont finalement faits selon les capacités des logiciels utilisés pour la modélisation. Certaines composantes doivent même être omises, car il n'est pas possible de les ajouter dans les modèles.

### 3.1.2 Description du modèle de référence

Suivant l'ensemble des informations récoltées, les caractéristiques de la maison de référence sont définies. On peut les séparer en deux grandes catégories. Premièrement, les caractéristiques dites physiques et, deuxièmement, les caractéristiques énergétiques. La première catégorie regroupe les paramètres associés à la construction, aux matériaux et, par le fait même, à l'isolation de la maison. Ces informations sont à la fois utilisées dans IE, le logiciel de modélisation des émissions intrinsèques, et dans HOT2000, le logiciel de simulation énergétique. La deuxième catégorie rassemble les informations utilisées exclusivement dans HOT2000, soit celles traitant de l'utilisation d'énergie, des sources de chaleur internes, des échanges d'air et autres paramètres. Le tableau 3.1 montre les principales caractéristiques physiques de la maison. Pour chacune d'entre elles, la nature de la justification ou la source d'information pour la définir est indiquée dans la colonne de droite.

**Tableau 3.1 Caractéristiques physiques de la maison de référence**

<i>Caractéristique</i>	<i>Valeur</i>	<i>Justification/source</i>
<b>Caractéristiques générales</b>		
Type de maison	Bungalow	Thibault
Forme	Rectangulaire	Simplicité
Nombre d'étages	1	Thibault
Présence d'un sous-sol	Oui	Thibault
Largeur	42 pi	Jugement
Profondeur	24 pi	Jugement

**Tableau 3.1 Caractéristiques physiques de la maison de référence (suite)**

<i>Caractéristique</i>	<i>Valeur</i>	<i>Justification/source</i>
Superficie du premier étage	1008 pi <sup>2</sup>	Recherche
Hauteur des plafonds	8 pi	Jugement
Hauteur de fondation hors sol	1 pi	Thibault
Orientation	Sud	Arbitraire
Durée de vie	60 ans	LEED
<b>Fondation</b>		
Dimensions semelle	10 po x 24 po	Plans de maison
Épaisseur des murs de béton	8 po	Plans de maison
Épaisseur de la dalle	4 po	Plans de maison
<i>Isolation sous la dalle :</i>		
Polystyrène extrudé	2 po (R10)	Plans de maison
Pare-vapeur en polyéthylène	6 mm	Plans de maison
<i>Isolation à l'extérieur des murs de fondation :</i>		
Polystyrène extrudé	1,5 po (R7,5)	Plans de maison
Pare-vapeur en polyéthylène	6 mm	Plans de maison
<b>Murs extérieurs</b>		
<i>De l'intérieur vers l'extérieur :</i>		
Peinture au latex		Thibault
Gypse	0,5 po (R0,45)	Plans de maison
Fourrure	Aucune	Limite logiciel
Pare-vapeur en polyéthylène	6 mm	Plans de maison
Charpente	2x6 au 16 po	Plans de maison
Laine de fibre de verre	6 po (R20)	Plans de maison
polystyrène extrudé	1 po (R5)	Thibault/limite logiciel
Pare-air (Tyvec)		Plans de maison
Fourrure	Aucune	Limite logiciel
Revêtement extérieur	Déclin de vinyle	Thibault
<b>Murs intérieurs</b>		
Peinture au latex		Thibault
Gypse	0,5 po (R0,45)	Jugement
Charpente	2x4 au 16 po	Jugement
Gypse	0,5 po (R0,45)	Jugement
Peinture au latex		Thibault
<b>Murs extérieurs sous-sol</b>		
Peinture au latex		Thibault
Gypse	0,5 po (R0,45)	Plans de maison
Charpente	2x3 au 24 po	Plans de maison
Polyuréthane giclé	1,5 po	Plans de maison
<b>Toiture</b>		
Inclinaison du toit	1/6	Maison existante
<i>De l'intérieur vers l'extérieur :</i>		
Peinture au latex		Thibault
Gypse	0,5 po (R0,45)	Plans de maison
Fourrure	Aucune	Limite logiciel
Pare-vapeur en polyéthylène	6 mm	Plans/Jugement
Panneau de polyisocyanurate	1 po (R5)	Plans/Jugement
Pare-air (Tyvec)		Plans/Jugement
Fermes de toit (chevrons)	2x4 au 16 po	Plans/Jugement
Laine de fibre de verre	9,5 po (R31)	Plans/Jugement
Panneau de copeaux (Aspenite)	0,5 po	Plans de maison
Revêtement toiture	Bardeau d'asphalte	Plans de maison

**Tableau 3.1 Caractéristiques physiques de la maison de référence (suite)**

<i>Caractéristique</i>	<i>Valeur</i>	<i>Justification/source</i>
<b>Portes et fenêtres</b>		
Nombre de fenêtres au premier étage	7	Maison existante
Superficie totale des fenêtres du premier étage	120 pi <sup>2</sup>	Maison existante/Jugement
Nombre de fenêtres du sous-sol	3	Maison existante
Superficie totale des fenêtres du sous-sol	18 pi <sup>2</sup>	Maison existante/Jugement
Type de fenêtre	À penture	Maison existante/Jugement
Matériaux des cadres de fenêtres	Vinyle	Maison existante/Jugement
Vitrage	Double	Jugement
Nombre de portes extérieures	2	Maison existante
Type de portes extérieures	Acier	Maison existante/Jugement
<b>Solives / Plancher premier étage</b>		
Hauteur	10 po	Plans de maison
Type de solives	Poutrelles en I	Limite logiciel/Jugement
Espacement des solives	16 po	Jugement
<i>Planchers :</i>		
Plancher en cèdre		Limite logiciel/Jugement
Contreplaqué		Limite logiciel/Jugement
Gypse	0,5 po (R0,45)	Jugement
Peinture au latex		
<i>Mur extérieur :</i>		
Laine de fibre de verre	6 po (R20)	Limite logiciel/Jugement
Contreplaqué	0,75 po	Plan maison/limite
Pare-air (Tyvec)		Limite logiciel/Jugement
Polystyrène extrudé	1 po (R5)	
Revêtement extérieur	Déclin de vinyle	

Le tableau 3.2 montre les principales caractéristiques reliées à la gestion de la chaleur, la colonne de droite indique aussi la justification ou la source d'information utilisée. Pour la maison de référence, plusieurs de ces valeurs sont celles qui sont entrées par défaut par le logiciel HOT2000.

**Tableau 3.2 Caractéristiques énergétiques de la maison de référence**

<i>Caractéristique</i>	<i>Valeur</i>	<i>Justification/source</i>
<b>Caractéristiques générales</b>		
Condition du sol	Conductivité normale	Valeur par défaut
Albédo des murs extérieurs	0,4	Valeur par défaut
Albédo du toit	0,84 (brun)	Jugement
<b>Températures</b>		
Température de chauffage de jour	70 °F	Jugement
Température de chauffage de nuit	64 °F	Jugement
Durée de la programmation de nuit	8 h	Jugement
Température de climatisation	77 °F	Jugement
Écart de température avant l'ouverture des fenêtres	9.9 °F	Jugement
Température de chauffage du sous-sol	68 °F	Jugement
Sous-sol climatisé	non	Jugement
<b>Charges de base</b>		
Nombre d'occupants adultes	2	Jugement
Pourcentage du temps à la maison	70%	Jugement
Fraction du gain applicable au sous-sol	15%	Valeur par défaut

**Tableau 3.2 Caractéristiques énergétiques de la maison de référence (suite)**

<i>Caractéristique</i>	<i>Valeur</i>	<i>Justification/source</i>
<b>Charges de base - Utilisation d'eau</b>		
Température de l'eau chaude	131 °F	Valeur par défaut
<i>Robinet :</i>		
Débit des robinets	8,3 L/min	Valeur par défaut
Utilisation des robinets par occupant	1,33 min/occ/j	Valeur par défaut
<i>Douche :</i>		
Température de l'eau	106 °F	Valeur par défaut
Débit de la pomme de douche	9,5 L/min	Valeur par défaut
Durée d'une douche moyenne	6,5 min	Valeur par défaut
Nombre de douches par semaine par occupant	5,2	Valeur par défaut
<i>Laveuse à linge :</i>		
Consommation d'eau	12 gal Imp	Valeur par défaut
Consommation d'énergie nominale	197 kWh/a	RNCan/HQ
Nombre de brassées de lavage par occupant	1,9 brassée/occ/sem	Valeur par défaut
Température de l'eau	Chaude	Valeur par défaut
<i>Lave-vaisselle :</i>		
Consommation d'eau	4 gal Imp	Valeur par défaut
Consommation d'énergie nominale	260 kWh/a	Valeur par défaut*
Nombre de cycles de lave-vaisselle	1,37 cycle/occ/sem	Valeur par défaut
<i>Autre :</i>		
Autre consommation d'eau par occupant	0,642 gal Imp/occ/j	Valeur par défaut
Nombre de toilettes à bas volume	0	Valeur par défaut
<b>Charges de base - Utilisation d'électricité</b>		
<i>Sécheuse</i>		
Proportion de brassées séchées à la sécheuse	60%	Valeur par défaut
Consommation d'énergie nominale	916 kWh/a	RNCan/HQ
<i>Four</i>		
Consommation d'énergie nominale	565 kWh/a	RNCan/HQ
<i>Réfrigérateur</i>		
Consommation d'énergie nominale	639 kWh/a	RNCan/HQ
<i>Autre</i>		
Proportion de lumières à la LED ou LFC	<25% (2,6 kWh/j)	Valeur par défaut
Autre consommation d'énergie	9,7 kWh/j	Valeur par défaut
Consommation extérieure moyenne	0,9 kWh/j	Valeur par défaut
<b>Infiltration d'air naturelle</b>		
Volume de la maison	16500 pi <sup>3</sup>	Calculé
Étanchéité moyenne de la maison	4,55 CAH @ 50 Pa	Valeur par défaut
Type de terrain	Banlieue, forêt	Jugement
Hauteur du plus haut plafond	10,5	Calculé
Protection des murs du vent	Forte	Jugement
<b>Ventilation</b>		
Requis de ventilation	0,34 CAH	Écohabitation
Type de ventilateur	HRV	Jugement
Débit d'apport d'air	159 pi <sup>3</sup> /min	Calculé
Efficacité à 32F	55%	Valeur par défaut
Efficacité à -13F	45%	Valeur par défaut
Débit d'évacuation de la sécheuse	150 pi <sup>3</sup> /min	Whirlpool
Durée d'utilisation de la sécheuse	15 min/j	Calculé
Débit d'évacuation des ventilateurs salle de bain	69,9 pi <sup>3</sup> /min	Valeur par défaut
Durée d'utilisation des ventilateurs salle de bain	72 min/j	Valeur par défaut
<b>Système de chauffage et climatisation</b>		



**Tableau 3.2 Caractéristiques énergétiques de la maison de référence (suite)**

<i>Caractéristique</i>	<i>Valeur</i>	<i>Justification/source</i>
Type de chauffage	Plinthes électriques	Jugement
Ventilateur du système de chauffage	N/A	Jugement
Débit du ventilateur du système d'air climatisé	145 pi <sup>3</sup> /min	Calculé par logiciel
Puissance du ventilateur air climatisé	53 W	Calculé par logiciel
Capacité des plinthes électriques	29003 btu/hr	Calculé par logiciel
Type de système d'air climatisé	Central divisé	Valeur par défaut
Capacité du climatiseur	4195,5 btu/hr	Calculé par logiciel
Efficacité du climatiseur	COP = 3	Valeur par défaut
Puissance de la résistance carter du A/C	60 W	Valeur par défaut
Ratio de chaleur sensible	0,76	Valeur par défaut
<b>Eau chaude</b>		
Volume du réservoir	41,6 gal Imp	Valeur par défaut

### 3.1.3 Justification des caractéristiques de la maison de référence

Cette section détaille certains choix parmi les plus importants pour la définition du modèle de la maison de référence.

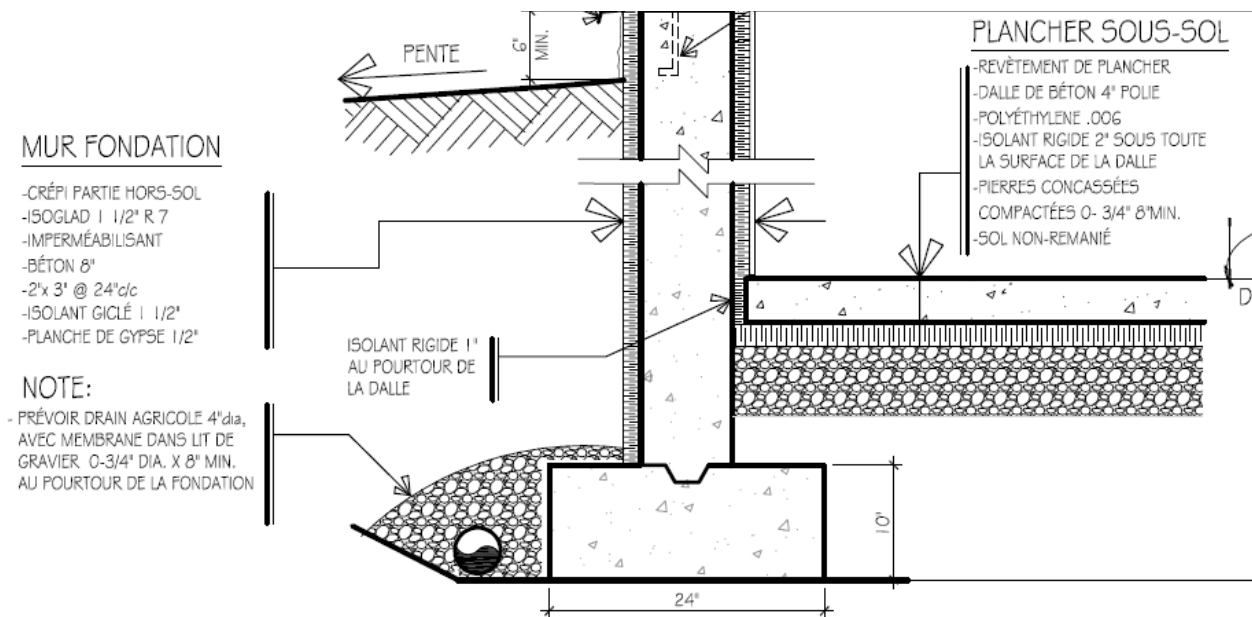
Le choix d'inclure un sous-sol à la maison de référence est définitif. Les sous-sols sont depuis longtemps très populaires au Québec. Selon Construction Massawippi, encore aujourd'hui, les trois quarts des maisons sont construits avec un sous-sol (A. Thibault, 2020). Cet élément représente donc bien la maison québécoise moyenne. La maison possède donc un total de deux étages : l'étage au niveau du sol, appelé le premier étage, et le sous-sol.

Un autre paramètre important est la superficie de plancher. La superficie moyenne des nouvelles maisons unifamiliales canadiennes est variable en fonction des régions, du revenu moyen des populations locales et de nombreux autres facteurs. Au cours des 5 dernières années, elle fut évaluée par de nombreux auteurs (Les affaires, Statistiques Canada, Qualman, ERE132). Elle se situe quelque part entre 1500 et 2500 pieds carrés (pi<sup>2</sup>). Compte tenu de la difficulté à s'en faire une idée précise, la moyenne entre ces deux valeurs est retenue, soit environ 2000 pi<sup>2</sup> (environ 186 mètres carrés (m<sup>2</sup>)). Cette valeur correspond à la superficie de plancher habitable totale et inclut chacun des étages de la maison. Dans le cas de notre modèle, la maison est de forme rectangulaire, elle fait 42 pied (pi) par 24 pi et est donc d'une superficie de 1008 pi<sup>2</sup> par étage, totalisant 2016 pi<sup>2</sup> avec le sous-sol.

La durée de vie de la maison est fixée à 60 ans pour la maison de référence. C'est la durée de vie minimale exigée par le crédit « MRc1 - Building life-cycle impact reduction » de LEED et c'est une durée couramment employée pour l'ACV des bâtiments. (U.S. Green Building Council, s. d.)

La fenestration au premier étage est assez conventionnelle. Il possède sept fenêtres, trois sur la façade sud et quatre sur la façade nord, totalisant 120 pi<sup>2</sup>. Le sous-sol ne comporte que trois petites fenêtres sur la façade nord, totalisant 18 pi<sup>2</sup>.

Des plans de maisons obtenus de Construction Massawippi indiquent, via des vues appelées « coupe de mur type », la majorité des matériaux utilisés dans la construction d'une maison conventionnelle respectant le Code de construction du Québec. Un aperçu de ce genre de dessin est illustré à la figure 3.3. La majorité des caractéristiques est obtenue de ces plans.



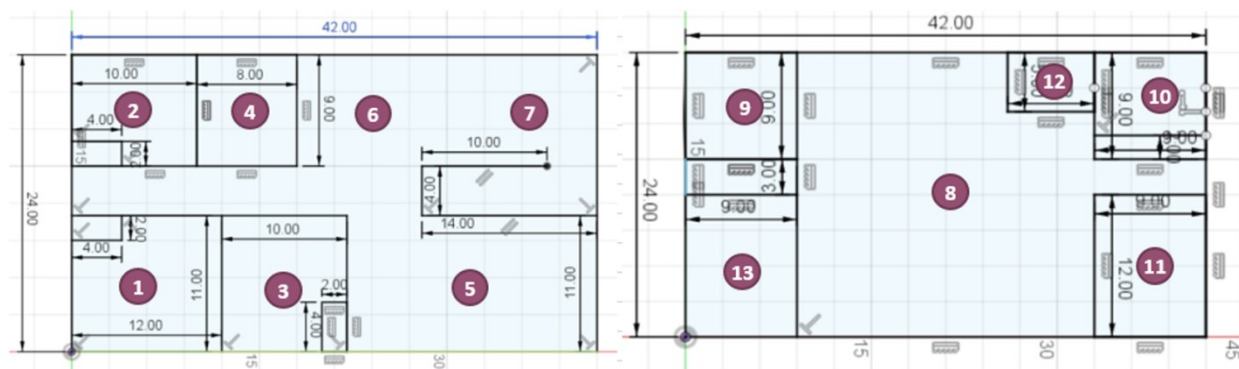
**Figure 3.3 Coupe de mur type d'un plan de maison au Code de construction du Québec** (tiré de : Thibault, 2020)

La prochaine section présente le fonctionnement des deux logiciels de modélisation. Ceux-ci offrent beaucoup de choix de matériaux, mais il reste tout de même certaines limitations. Des choix de conceptions découlent de ces limitations et voici donc quelques substitutions qui ont été faites en adaptation aux logiciels.

IE n'offre pas de matériaux pour le recouvrement des planchers, le déclin de pin, un matériau de recouvrement extérieur, est donc employé pour simuler un plancher flottant ou un plancher de bois franc. De la cellulose soufflée remplace le polyuréthane giclé pour l'isolation des murs de sous-sol, l'influence de cette substitution est cependant compensée par un calcul manuel expliqué dans le chapitre de la méthodologie. Certains panneaux d'isolation spécialisés sont remplacés, comme l'Isoclad par du polystyrène extrudé et l'Énermax par un assemblage de polyiso, de pare-vapeur et de pare-air.

La maison de référence utilise un système de chauffage 100% électrique. Des statistiques de 2018 de Ressources naturelles Canada affichent que 66,7% de l'énergie consommée par les habitations résidentielles est électrique (Gouvernement du Canada, 2020). En contrepartie, environ 21,7% de cette énergie provient du bois de chauffage, 6,9% du gaz naturel et 4,3% du mazout.

En faisant cet exercice pour la maison à l'étude on obtient une valeur de 75 L/s, soit 159 pieds cubes par minutes ( $\text{pi}^3/\text{min}$ ) telles qu'illustrées au tableau 3.3. La figure 3.4 montre la disposition des pièces numérotées sur les deux étages de la maison.



24

**Tableau 3.3 Requis de ventilation selon le Code national du bâtiment** (inspiré de Écohabitation, 2021)

No.	Pièce	Capacité (L/s)
1	chambre des maitres	10
2	chambre 2	5
3	bureau	5
4	salle de bain	5
5	salon	5
6	salle a manger	5
7	cuisine	5
8	sous-sol (séjour)	10
9	chambre 3	5
10	chambre 4	5
11	chambre 5	5
12	salle de bain	5
13	salle service	5
	Total	<b>75</b>
	Total (en pi <sup>3</sup> /min)	159

Le standard LEED se réfère à la norme 62.2 de la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning* (ASHRAE), (l'organisation internationale définissant les standards du même nom dans les domaines du chauffage, la ventilation, l'air climatisé et la production de froid), pour déterminer les requis d'échange d'air (Écohabitation, 2021a). Celle-ci se base sur le nombre de chambres et la superficie totale de la maison. La figure 3.5 montre que le requis selon cette norme serait de 75 pi<sup>3</sup>/min, ce qui est en deçà de la valeur demandée par le code du bâtiment.

Aire de plancher conditionnée (pi <sup>2</sup> )	Chambres à coucher				
	0, 1	2, 3	4, 5	6, 7	> 7
≤1,500	30	45	60	75	90
1,501–3,000	45	60	75	90	105
3,001–4,500	60	75	90	105	120
4,501–6,000	75	90	105	120	135
6,001–7,500	90	105	120	135	150
> 7,500	105	120	135	150	165

Norme ASHRAE 62.2: débit d'air minimum des systèmes de ventilateur récupérateur de chaleur continue en pieds cubes par minute.  
© LEED Canada pour les habitations

**Figure 3.5 Requis d'échange d'air en fonction de la superficie de plancher et du nombre de chambres à coucher selon LEED** (tiré de : Écohabitation)

On dit aussi qu'au Québec il faudrait un minimum de 0,33 changement d'air à l'heure (CAH) (Écohabitation, 2021a). Pour la maison étudiée, cela correspondrait à 91 pi<sup>3</sup>/min. On se base alors sur le code du bâtiment pour définir un échange d'air à 159 pi<sup>3</sup>/min.

### **3.2 Quantification des émissions intrinsèques**

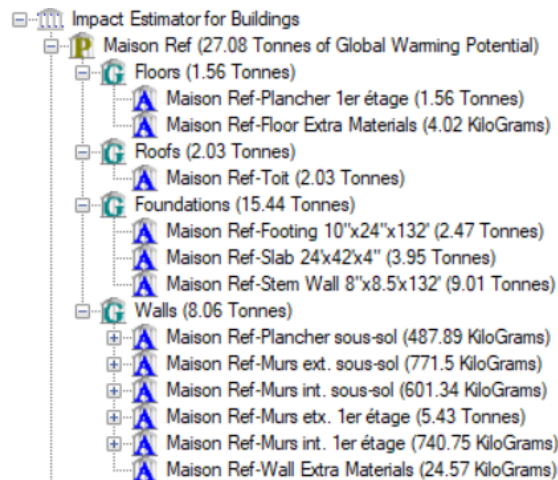
IE est un logiciel de modélisation développé par l'institut de matériaux durables Athena. Il a pour fonction de calculer les émissions intrinsèques des matériaux utilisés dans la construction d'un bâtiment. Il s'agit d'un produit canadien accessible gratuitement et il est largement utilisé dans l'industrie de l'analyse de cycle de vie (ACV) au Québec (Thibodeau, 2020). Il est également recommandé par le système de standardisation LEED (LEEDuser, 2017). Aucun autre logiciel accessible gratuitement n'est comparable et donc l'utilisation de celui-ci est de mise.

Les PRP inclus dans IE proviennent de plusieurs DEP. Le guide de l'utilisateur d'IE indique les références sur lesquelles le logiciel se base pour déterminer les valeurs de PRP qu'il utilise. Il n'est cependant pas toujours possible de retracer la source de ces informations. La recherche de PRP via d'autres sources permet de comparer avec les valeurs utilisées par IE et observer si des écarts significatifs existent. Cette comparaison permet de valider l'exactitude des valeurs fournies par IE pour quelques matériaux importants. Dans les cas où de très grands écarts sont observés entre deux sources, il est possible d'investiguer cet écart ou simplement d'évaluer l'impact de choisir l'une ou l'autre des deux valeurs et d'en faire mention dans l'interprétation des résultats.

#### **3.2.1 Fonctionnement du logiciel de modélisation des émissions intrinsèques - IE**

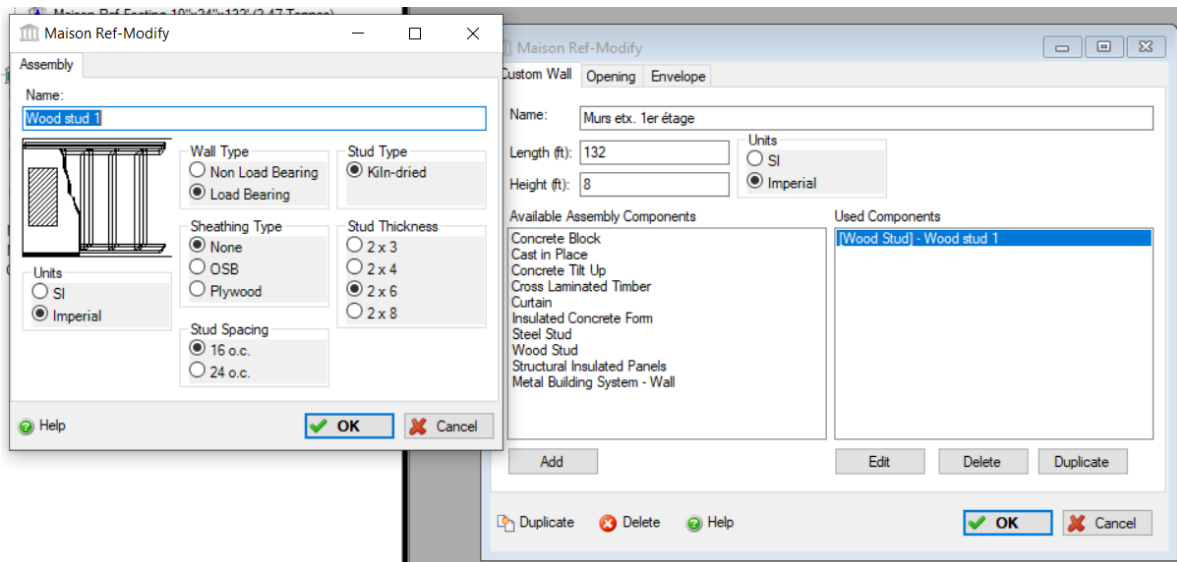
Lors de l'utilisation d'IE, il faut d'abord choisir quelques paramètres généraux tels que la ville où se situe la construction et l'espérance de vie du bâtiment. On y modélise la maison par composantes comme les murs ou les planchers. Pour chaque composante, les dimensions et les matériaux utilisés sont sélectionnés. Le logiciel permet ensuite de créer un rapport présentant les émissions de GES parmi différents polluants, sous deux formats différents. L'un divise les émissions par groupes d'assemblage et l'autre par étapes du cycle de vie pour l'ensemble de la construction. Le rapport montrant les différents groupes d'assemblage donne une valeur en kgCO<sub>2</sub>eq pour les quatre groupes : les fondations, les planchers, les murs et les toits. On doit choisir à priori les frontières de l'ACV, soit de A à C ou de A à D. L'autre type de rapport montre les émissions pour la maison au complet, mais elles sont divisées en chacune des étapes du cycle de vie.

Il est possible d'ajouter autant de composantes que nécessaire se classant parmi les quatre grandes catégories. On peut voir à la figure 3.6 l'arbre des composantes pour le modèle de la maison de référence.



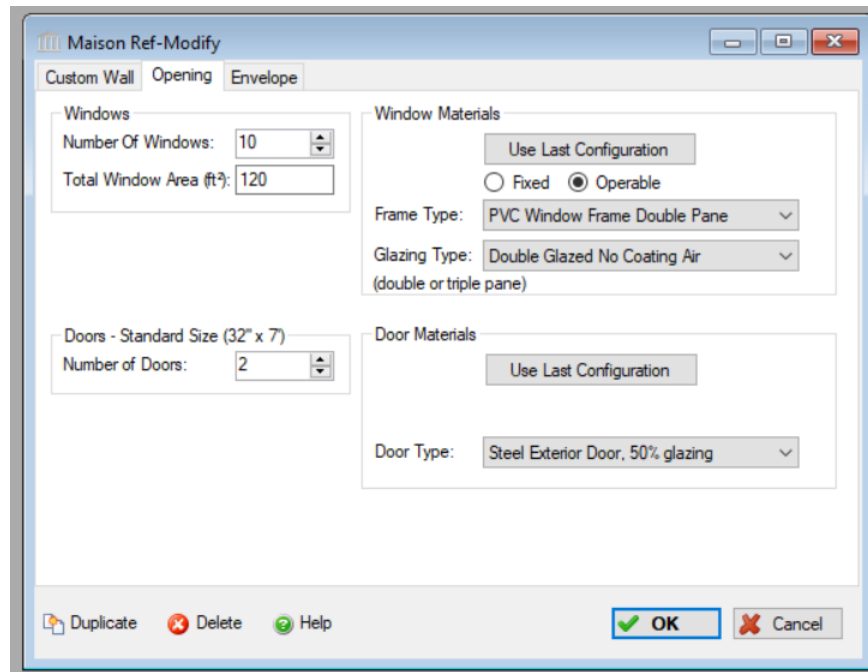
**Figure 3.6 Aperçu de l'arbre des composantes pour le modèle de la maison de référence dans IE** (tiré de : IE, 2020)

Pour chaque composante, on choisit parmi les options disponibles les caractéristiques désirées. On peut voir par exemple à la figure 3.7 qu'une charpente en bois est choisie pour les murs extérieurs du premier étage. On y sélectionne l'épaisseur des montants, leur espacement, s'il s'agit d'un mur porteur et quel type de panneau de bois y est ajouté. Il faut aussi sélectionner la longueur et la hauteur du mur. Dans ce cas, la longueur vaut pour les quatre murs extérieurs, soit 132 pi, et la hauteur est de huit pieds.



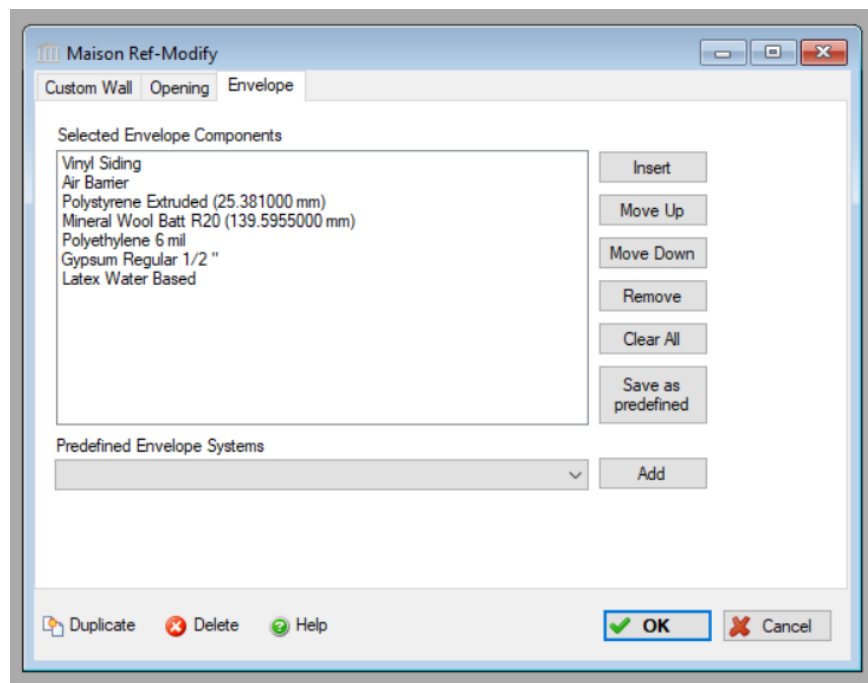
**Figure 3.7 Aperçu de la sélection des paramètres pour les murs dans IE** (tiré de : IE, 2020)

Pour les murs, le deuxième onglet permet de choisir les fenêtres et portes qui y seront intégrées. On choisit le nombre de fenêtres, leur superficie totale, le type de châssis et le type de vitrage. On voit à la figure 3.8 par exemple que des fenêtres en PVC à double vitrage sont sélectionnées.



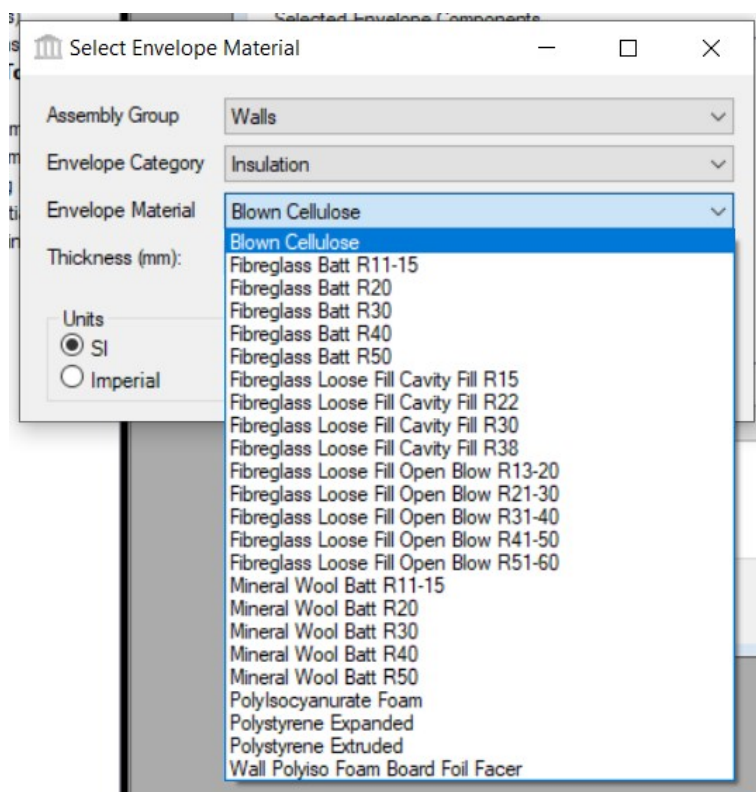
**Figure 3.8 Aperçu de la sélection des paramètres pour les portes et les fenêtres dans IE** (tiré de : IE, 2020)

Le troisième onglet sert à ajouter les enveloppes, notamment tous les isolants qui s'ajoutent sur la surface intérieure ou extérieure du mur. On ajoute les panneaux de gypse, la laine isolante, les panneaux d'isolant rigides, le revêtement extérieur, etc. La figure 3.9 montre un aperçu de ce dernier onglet.



**Figure 3.9 Aperçu de la sélection des paramètres d'enveloppe dans IE** (tiré de : IE, 2020)

Les choix offerts sont limités. La figure 3.10 montre l'ensemble des isolants qu'il est possible d'ajouter. On remarque par exemple que le polyuréthane giclé, un isolant couramment appliqué sur les murs de fondations, n'est pas disponible. Dans certains cas, des ajustements sont à faire et on remplace le matériau voulu par un autre qui peut être presque équivalent.



**Figure 3.10** Liste des isolants muraux disponibles dans IE (tiré de : IE, 2020)

Les menus sont similaires pour les autres types de composantes. Il est possible également d'ajouter des matériaux supplémentaires qui ne sont pas nécessairement associés à une composante. Par exemple, on peut vouloir ajouter de l'isolant dans le sol autour d'une fondation. Dans ce cas, il suffit de choisir le type de matériel et le volume désiré. Impact Estimator calcule généralement les émissions associées à l'installation des matériaux et estime le nombre de remplacements nécessaire. Dans le cas d'ajout de matériaux supplémentaires, il ne pourra pas faire ces estimations aussi précisément.

Une fois l'ensemble des composants modélisé, on extrait un rapport. La figure 3.11 montre les résultats par groupe d'assemblage pour la maison de référence. On s'intéresse à la première ligne du tableau qui correspond au potentiel de réchauffement climatique pour les 60 ans d'espérance de vie de la maison.



## LCA Measure Table By Assembly Groups (A to C)

Project: Maison Ref

LCA Measures	Unit	Foundations	Walls	Columns and Beams	Roofs	Floors	Project Extra Materials	Total
Global Warming Potential	kg CO <sub>2</sub> eq	15435	8056	0	2030	1559	0	27081
Acidification Potential	kg SO <sub>2</sub> eq	81	69	0	16	14	0	179
HH Particulate	kg PM <sub>2.5</sub> eq	19	31	0	6	6	0	62
Eutrophication Potential	kg N eq	6	3	0	1	1	0	11
Ozone Depletion Potential	kg CFC-11 eq	0	0	0	0	0	0	0
Smog Potential	kg O <sub>3</sub> eq	1563	829	0	339	287	0	3019
Total Primary Energy	MJ	177086	143808	0	75322	34522	0	430738
Non-Renewable Energy	MJ	169786	132843	0	68170	27227	0	398026
Fossil Fuel Consumption	MJ	144317	128879	0	67199	26303	0	366699

**Figure 3.11 Exemple de résultats par groupe d'assemblage dans IE** (tiré de : IE, 2020)

### 3.3 Quantification des émissions opérationnelles

Une deuxième analyse permet de déterminer les émissions de GES opérationnelles issues de l'utilisation du bâtiment. Ces émissions proviennent de la consommation d'électricité et du chauffage. Pour les bâtiments utilisant uniquement le chauffage électrique, il suffit de calculer la quantité d'énergie électrique consommée annuellement et de la multiplier par un facteur d'émission pour l'électricité.

La consommation d'électricité de la maison est évaluée par une analyse énergétique faite avec le logiciel HOT2000, développé par RNCAN. Celui-ci permet de modéliser une habitation avec toutes ses caractéristiques pertinentes et calcule la quantité d'électricité en kilowattheure (kWh) consommée par année.

#### 3.3.1 Fonctionnement du logiciel de modélisation énergétique - HOT2000

Le logiciel HOT2000 permet de personnaliser la maison de façon très précise. Tout comme IE, il fonctionne par l'ajout de composantes (ex. : un mur) qui peuvent être éditées par la suite. Pour chaque composante, il faut définir les dimensions générales, sélectionner tous les matériaux via des menus déroulants et entrer tout autre paramètre nécessaire. Le logiciel calcule automatiquement une valeur de résistance thermique  $R$  équivalente pour l'ensemble de la composante modélisée. (En Amérique du Nord, les isolants sont caractérisés par leur résistance thermique «  $R$  », ou « valeur  $R$  », qui s'exprime en  $\text{pi}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h} / \text{BTU}$ . Pour simplifier l'écriture, ces unités sont souvent omises ou représentées aussi par la lettre «  $R$  » qui peut ainsi indiquer autant la métrique que ses propres unités, ex. : isolant R20.) Pour chaque mur, des portes, fenêtres et solives peuvent être ajoutées. (Les solives sont les poutres secondaires qui constituent le plancher entre deux étages. Elles peuvent aussi désigner toute la structure qui se trouve entre le plafond d'un étage et le plancher de celui d'au-dessus.) Le concept est le même pour ces éléments : l'ensemble des paramètres choisis détermine une valeur  $R$ . La figure 3.12 donne un aperçu de l'interface pour la modélisation d'un mur.

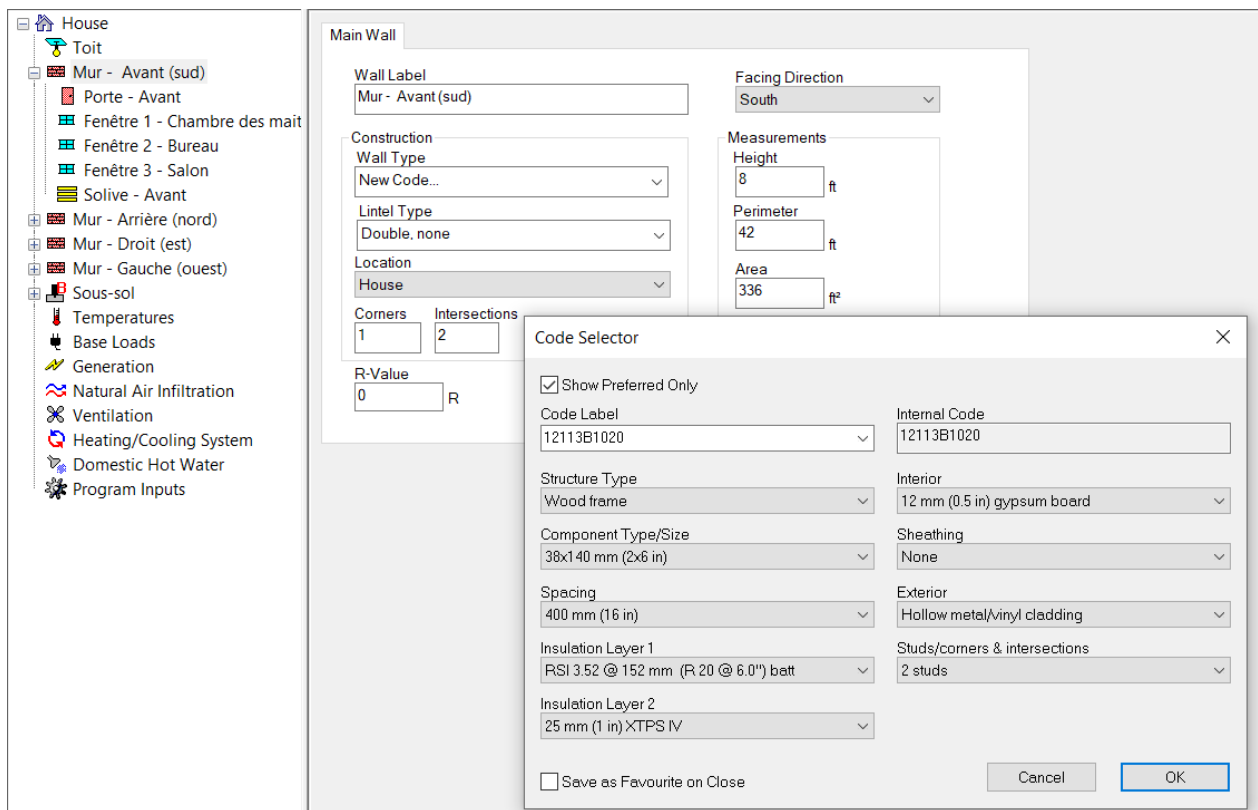


Figure 3.12 Aperçu de la modélisation d'un mur dans HOT2000 (tiré de : HOT2000, 2020)

La modélisation des murs, du toit, de la fondation, des planchers, des portes et des fenêtres sert principalement à définir le niveau d'isolation et les dimensions de chaque face extérieure de la maison. Jusqu'ici, ce sont essentiellement les mêmes caractéristiques qui sont rentrées dans IE, puisqu'elles concernent les matériaux de construction.

Il vient ensuite un éventail de paramètres qui ont trait proprement à la chaleur et à l'énergie. Les prochaines sections à compléter sont celles des températures, des charges de base, de l'infiltration naturelle d'air, des systèmes de chauffage et de climatisation et de l'eau chaude domestique. Les sections sur la génération et les entrées de programme ne concernent pas cette analyse.

Dans la section dédiée aux températures, il faut déterminer les paramètres de chauffage qui représente en fin de compte la programmation des thermostats de la maison.

La section sur les charges de bases (*base loads*) contient beaucoup d'information sur les sources de chaleur internes à la maison et sur les consommations d'électricité des appareils ménagers. Dans cette section, on choisit le nombre d'occupants de la maison et le temps qu'ils y passent. On définit la consommation d'énergie et d'eau chaude de la laveuse à linge, du lave-vaisselle, du réservoir à eau chaude et de la douche. Les habitudes de consommation sont aussi considérées, comme le temps passé sous la

douche, le nombre de brassées de lavage par semaine et le pourcentage du linge séché à la sècheuse. On choisit les débits des robinets et de la pomme de douche. Il faut ensuite sélectionner le pourcentage de lumières à la diode électroluminescente (DEL), la consommation annuelle du four, de la sècheuse et autres.

Dans la section suivante, on indique le requis de ventilation. On indique aussi le type de système de ventilation installé, les autres ventilateurs comme celui de la salle de bain, leur débit et leur puissance. La section sur le système de chauffage et de climatisation sert à indiquer les types de systèmes en question. On décrit aussi les puissances et les efficacités de chacun. Dans la dernière section, celle sur l'eau chaude domestique, on indique le volume du réservoir à eau chaude.

Une fois l'ensemble des paramètres entrés, on peut extraire un rapport qui donne essentiellement les résultats sous forme d'énergie consommée annuellement dans chacune des catégories : chauffage des espaces, refroidissement des espaces, chauffage de l'eau, les charges de bases et puis la ventilation. La somme des valeurs dans chacune de ces catégories donne la consommation d'énergie annuelle pour l'ensemble de l'habitation. La figure 3.13 montre un exemple de résultat extrait de HOT2000.

<b>ESTIMATED ANNUAL FUEL CONSUMPTION SUMMARY</b>						
<b>Fuel</b>	<b>Space Heating</b>	<b>Space Cooling</b>	<b>DHW Heating</b>	<b>Baseloads</b>	<b>Ventilation</b>	<b>Total</b>
<b>Electricity (kWh)</b>	11986.4	1076.6	3500.8	6490.8	672.9	23727.5

Figure 3.13 Aperçu du résumé des résultats fourni par le rapport de HOT2000 (tiré de : HOT2000, 2020)

### 3.4 Empreinte carbone globale

Une fois les résultats extraits de chacun des deux logiciels, les émissions de GES sont compilées et présentées sous forme d'émissions moyennes annuelles. Les résultats d'IE sont donnés pour les 60 années du bâtiment, le résultat extrait est donc divisé par 60. HOT2000 donne une valeur en kWh par année, il faut alors convertir cette valeur en kgCO<sub>2</sub>eq en la multipliant par le facteur d'émission de la consommation d'électricité au Québec.

Le facteur d'émission pour l'électricité québécoise, exprimé en grammes de CO<sub>2</sub>eq par kilowattheure (gCO<sub>2</sub>eq/kWh), varie selon les sources. Environnement et Changement climatique Canada (ECC) émet chaque année un rapport d'inventaire national (RIN) des GES. Ce rapport se rapporte à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et, dans celui-ci, le facteur d'émission prescrit pour l'électricité québécoise est de 1,5 gCO<sub>2</sub>eq/kWh (ECC, 2021). Ce facteur ne considère que les émissions directes de la production et de la distribution d'électricité et il est utilisé pour

les inventaires GES, notamment des entreprises, suivant la norme ISO 14064. Le bouquet électrique québécois est composé de 94,5% d'hydroélectricité. Il est donc pertinent de tenir compte des émissions associées à la construction de barrages et de réservoirs pour les centrales hydroélectriques. Dans le cadre de ce travail, le calcul des émissions opérationnelles considère plutôt un facteur d'émission de 34,5 gCO<sub>2</sub>eq/kWh pour l'utilisation d'électricité. Cette valeur est estimée par une récente étude menée par des spécialistes du Québec et elle considère, au meilleur de la connaissance, les émissions de tout le cycle de vie de la production de l'électricité consommée au Québec (Hydro-Québec, 2021). Cette valeur est prescrite par Hydro-Québec pour les ACV depuis mai 2021, elle était à 20,72 gCO<sub>2</sub>eq/kWh avant cette date. Les résultats des émissions opérationnelles ont donc bondi de 67% lors de la mise à jour conséquente des calculs. La figure 3.14 présente en exemple les résultats pour la maison de référence.

<i><b>Intrinsèques</b></i>			
<b>Source</b>	<b>Unités</b>		
Fondations	kgCO <sub>2</sub> eq	15435	58%
Murs	kgCO <sub>2</sub> eq	6982	26%
Toit	kgCO <sub>2</sub> eq	2030	8%
Planchers	kgCO <sub>2</sub> eq	1975	7%
<b>Total</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq</b>	<b>26423</b>	
<b>Total par année</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq</b>	<b>440</b>	
<i><b>Électricité</b></i>			
<b>Source</b>	<b>Unités</b>		
Chauffage	kWh	11986	51%
Climatisation	kWh	1077	5%
Eau chaude	kWh	3501	15%
Charges internes (autre)	kWh	6491	27%
Ventilateurs	kWh	673	3%
<b>Total</b>	<b>kWh</b>	<b>23728</b>	
<b>Coefficient d'émission</b>	<b>gCO<sub>2</sub>/kWh</b>	<b>34,5</b>	
<b>Émission de GES</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq</b>	<b>819</b>	
<i><b>Global</b></i>			
<b>Source</b>	<b>Unités</b>		
Total intrinsèque (A-C)	kgCO <sub>2</sub> eq	440	35%
Total énergie	kgCO <sub>2</sub> eq	819	65%
<b>Grand total</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq</b>	<b>1259</b>	

Figure 3.14 Exemple de tableau compilant les résultats

### 3.5 Post-traitement

Une fois les résultats extraits des deux logiciels, des modifications peuvent être apportées manuellement. Certains matériaux ne sont pas disponibles dans les options d'IE. Un calcul manuel permet de les inclure

si une valeur de PRP fiable est identifiée pour ceux-ci via une autre source comme une DEP ou un article scientifique. Par exemple, pour la maison de référence, l'isolation choisie pour l'intérieur de la charpente du sous-sol est le polyuréthane giclé. Ce matériau n'étant pas dans IE, on utilise la méthode suivante pour le simuler.

La première étape est de choisir un matériau similaire à celui qui est manquant dans IE. En l'absence du polyuréthane giclé, la cellulose soufflée est sélectionnée avec les mêmes dimensions et donc le même volume que le matériau voulu initialement. La deuxième étape consiste à extraire les résultats d'émissions et l'inventaire des matériaux. À partir de l'inventaire des matériaux, le volume de cellulose giclé utilisé est identifié. À l'aide de la résistance thermique des deux matériaux, le volume équivalent de polyuréthane giclé qui confère la même valeur R peut être calculé. De cette façon on évite de devoir modifier la simulation énergétique. Les PRP (A1-A3) des deux matériaux sont utilisés pour calculer les émissions associées aux volumes respectifs de ceux-ci. La différence de ces deux émissions donne la correction à apporter aux résultats d'IE. Ce calcul considère que les émissions après A3 seront équivalentes pour les deux isolants. Le tableau 3.4 montre le résultat obtenu pour cet exemple.

**Tableau 3.4 Différence d'émissions dues au remplacement de la cellulose par le polyuréthane**

<i>Caractéristique</i>	<i>Unité</i>	<i>Cellulose soufflée</i>	<i>Polyuréthane giclé</i>
Volume	m <sup>3</sup>	3,825	3,589
Résistance thermique	R/in	3,8	4,05
PRP (A1-A3)	kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	3,83	40,42
Émissions	kgCO <sub>2</sub> eq	14,6	145,1
Différence d'émissions	kgCO <sub>2</sub> eq	<b>+130,4</b>	

Cette même manipulation est utilisée pour le remplacement du polystyrène ou de la laine de verre par du chanvre.

## 4 RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE LA MAISON DE RÉFÉRENCE

Le tableau 4.1 montre les résultats obtenus pour la maison de référence (tableau précédemment montré en exemple à la figure 3.14).

**Tableau 4.1 Résultats de l'analyse pour la maison de référence**

<i>Intrinsèques</i>			
Source	Unités		
Fondations	kgCO <sub>2</sub> eq	15435	58%
Murs	kgCO <sub>2</sub> eq	6982	26%
Toit	kgCO <sub>2</sub> eq	2030	8%
Planchers	kgCO <sub>2</sub> eq	1975	7%
<b>Total</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq</b>	<b>26423</b>	
<b>Total par année</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq</b>	<b>440</b>	
<i>Électricité</i>			
Source	Unités		
Chauffage	kWh	11986	51%
Climatisation	kWh	1077	5%
Eau chaude	kWh	3501	15%
Charges internes (autre)	kWh	6491	27%
Ventilateurs	kWh	673	3%
<b>Total</b>	<b>kWh</b>	<b>23728</b>	
<b>Coefficient d'émission</b>	<b>gCO<sub>2</sub>/kWh</b>	<b>34,5</b>	
<b>Émission de GES</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq</b>	<b>819</b>	
<i>Global</i>			
Source	Unités		
Total intrinsèque (A-C)	kgCO <sub>2</sub> eq	440	35%
Total énergie	kgCO <sub>2</sub> eq	819	65%
<b>Grand total</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq</b>	<b>1259</b>	

Les émissions de GES totales sur 60 ans sont environ de 75 500 kgCO<sub>2</sub>eq, ce qui revient à 1 259 kgCO<sub>2</sub>eq en moyenne annuellement. Les émissions intrinsèques et opérationnelles contribuent au bilan avec 440 kgCO<sub>2</sub>eq/a et 819 kgCO<sub>2</sub>eq/a respectivement.

Comme expliqué précédemment, la récente mise à jour du facteur d'émission pour l'électricité fait augmenter les émissions opérationnelles de 67%. Celles-ci s'évalueraient à 492 kgCO<sub>2</sub>eq/a en considérant le facteur de 2020, des émissions presque équivalentes aux émissions intrinsèques.

Une étude publiée par Écohabitation avait évalué les émissions d'une maison conventionnelle à 60 950 kgCO<sub>2</sub>eq sur 60 ans avec une contribution aussi pratiquement équivalente des deux types

d'émissions (Mignot et Duchaine, 2020). Elle utilisait aussi IE et son résultat serait à moins de 10% de différence avec celui de la présente étude en 2020.

Un calculateur simpliste d'Hydro-Québec permet d'estimer la facture d'électricité moyenne d'une maison détachée équipée d'un système de climatisation à 24 000 kWh (Hydro-Québec, s. d.-b). La division de la consommation pour le modèle de référence calculé par HOT2000 et celle estimée par Hydro-Québec sont comparées au tableau 4.2. Les chiffres montrent que les résultats de cette étude collent bien au modèle théorique.

**Tableau 4.2 Comparaison des consommations d'électricité entre le modèle de référence et les moyennes d'Hydro-Québec (kWh/a)** (inspiré de : Hydro-Québec, s. d.-b)

	<i>Modèle référence</i>		<i>Hydro-Québec</i>	
Chauffage	11986	51%	13200	55%
Climatisation	1077	5%	720	3%
Chauffage de l'eau	3501	15%	3840	16%
Autres	7164	30%	6240	26%
Total	23728		24000	

La maison existante sur laquelle s'est inspiré le modèle pour cette étude avait consommé pour sa part 23 200 kWh en 2020, selon les factures d'électricité. Cette valeur et celle du calculateur d'Hydro-Québec pour le total montrent une différence de moins de 3% avec les résultats extraits de HOT2000.

Ces comparaisons avec d'autres sources permettent d'augmenter le degré de confiance envers les résultats issus des modélisations.

En tenant compte du fait que cette simulation considère que deux adultes habitent la maison, la somme des émissions peut être divisée en deux pour attribuer un total de 631 kgCO<sub>2</sub>eq/a par personne. Les données de 2011 d'une étude albertaine attribuaient en moyenne, par personne au Québec, 710 kgCO<sub>2</sub>eq/a pour le chauffage des maisons et 810 kgCO<sub>2</sub>eq/a pour leur construction (Fellows et Dobson, 2017). La somme de ces valeurs donne un total de 1 520 kgCO<sub>2</sub>eq/a, soit presque 2,5 fois les résultats obtenus, mais aucun détail n'explique leur provenance et il est difficile d'affirmer si ces valeurs sont comparables. Les émissions de chauffage sont assurément plus grandes en moyenne lorsqu'on considère les maisons québécoises qui ne chauffent pas uniquement à l'électricité, il est donc attendu que la moyenne québécoise surpasse le résultat de la maison de référence. Les émissions de « construction résidentielle » de l'étude incluent peut-être d'autres travaux reliés à une propriété comme le terrassement et l'entrée de cour ou la construction de garages et de cabanons. Cela aurait aussi l'effet d'augmenter le total.

Les émissions associées à l'habitation, pour les adultes de notre étude, représenteraient environ 4% de leur empreinte carbone totale, si on la considère équivalente à la moyenne québécoise s'élevant à environ 15 000 kgCO<sub>2</sub>eq/a. C'est relativement peu puisque, en moyenne, 38% de leur empreinte carbone est attribuée à leurs déplacements. Ce résultat annonce déjà partiellement le dénouement de ce travail, à savoir que l'habitation n'est pas la catégorie d'émissions de GES ayant le meilleur potentiel de réduction pour l'empreinte carbone personnelle.

Si le calcul de l'énergie opérationnelle fait dans HOT2000 est probablement très près de la réalité, le calcul du carbone intrinsèque dans IE ne considère que les matériaux d'une maison complètement vide. Pour obtenir un portrait plus complet, il faudrait ajouter, la plomberie, les circuits électriques, les matériaux de finition, les systèmes de chauffage, les meubles, les appareils ménagers, le perron, la piscine, etc. La valeur obtenue n'indique donc qu'un ordre de grandeur et est peu révélatrice en soi. La construction de différents modèles permet cependant de se comparer à cette valeur et d'apporter des constats intéressants sur les réductions.



## **5 ANALYSE DES MODIFICATIONS INDIVIDUELLES**

La première analyse faite sur la maison de référence a permis d'obtenir des informations essentielles pour la suite du travail. L'expérience acquise avec les logiciels et la recherche de PRP permettent de prendre conscience des limites de la méthode. La vue des premiers résultats permet aussi de cerner les plus grandes sources d'émissions du modèle étudié et de sélectionner les concepts écologiques pertinents.

### **5.1 Sélection des concepts écologiques et modifications testées**

Les concepts d'habitation écologique se traduisent en différentes modifications précises pouvant être apportées à la maison de référence. Le choix des modifications sélectionnées pour ce travail sont basées principalement sur leur facilité, voire la faisabilité, de les inclure dans les modèles. Certaines modifications sont très faciles à intégrer et pour d'autres c'est pratiquement impossible. Par exemple, il était désiré initialement d'évaluer l'impact d'un modèle intégrant tous les concepts de la maison passive. Or, le logiciel de modélisation pour la simulation énergétique ne permet pas de considérer la masse thermique des différents matériaux, il limite l'utilisateur au choix de la masse thermique globale de la maison. Les modifications ont aussi été sélectionnées lorsque des données suffisamment fiables étaient accessibles. Par exemple, la maison utilisant la paille comme isolant est sans doute très écologique, mais les seules valeurs de PRP trouvées pour ce matériau sont trop incertaines. Dans certains cas comme pour celui-ci, un résultat approximatif est tout de même montré.

Les modifications apportées à la maison de référence sont organisées en catégories, qui représentent les concepts écologiques d'habitation, au tableau 5.1. La première catégorie touche le design même de la maison ou le mode d'habitation. Elle inclut l'option de remplacer le sous-sol par un étage supplémentaire, celle de réduire la taille de la maison, celle d'augmenter le nombre d'habitants de la même maison et celle d'augmenter la durée de vie du bâtiment. La deuxième catégorie regroupe les modifications qui consistent en l'ajout de matière isolante. Ces modifications auront pour effet d'augmenter les émissions intrinsèques, mais de réduire les émissions opérationnelles. La troisième catégorie est celle des mesures qui améliorent l'efficacité énergétique. Elles auront pour effet de réduire la facture opérationnelle sans avoir d'effet significatif sur le carbone intrinsèque. La quatrième catégorie est dédiée au remplacement de matériaux polluants par des alternatives ayant une plus faible empreinte carbone. L'effet est uniquement senti sur les émissions intrinsèques de la maison puisque, lors de ces substitutions, on s'assure de conserver les mêmes niveaux d'isolation. La catégorie numéro cinq ne contient qu'une modification bien particulière qui assume de meilleures habitudes de consommation de la part des occupants de la maison. Enfin, la sixième catégorie teste le chauffage aux énergies fossiles et au bois.

**Tableau 5.1 Modifications apportées à la maison de référence organisées en catégories**

Modification	Impact GES	
	Intrinsèque	Opérationnel
<b>1 Design</b>	<b>Aug./Dim.</b>	<b>Aug./Dim.</b>
1.1 Maison deux étages sur dalle		
1.2 Maison 50% plus petite, un seul étage		
1.3 Deux fois plus d'habitants - 2 -> 4		
1.4 Durée de vie maison 75 ans (+25%)		
<b>2 Ajout d'isolation</b>	<b>Augmente</b>	<b>Diminue</b>
2.1 Ajout de panneaux rigides polystyrène		
2.2 Fenêtres performantes		
2.3 Laine de verre plus épaisse		
<b>3 Efficacité énergétique</b>	<b>-</b>	<b>Diminue</b>
3.1 Étanchéité supérieure		
3.2 Électroménagers efficaces		
3.3 VRC et A/C efficaces		
<b>4 Matériaux alternatifs</b>	<b>Diminue</b>	<b>-</b>
4.1 Polyisocyanurate		
4.2 Chanvre, remplacement de la laine		
4.3 Chanvre, remplacement du polystyrène		
4.4 Paille, remplacement de la laine		
4.5 Béton avec liants écologiques		
<b>5 Habitudes de consommation</b>	<b>-</b>	<b>Diminue</b>
5.1 Meilleures habitudes de consommation		
<b>6 Système de chauffage alternatif</b>	<b>-</b>	<b>Augmente</b>
6.1 Chauffage au gaz naturel		
6.2 Chauffage au propane		
6.3 Chauffage à l'huile		
6.4 Chauffage au bois - poêle aux granules**		

Les sections qui suivent présentent en détail chacune des modifications et comment elles sont intégrées individuellement dans un nouveau modèle. Les émissions intrinsèques et opérationnelles de ces modèles sont comparées à celles de la maison de référence. Le résultat est montré en pourcentage de réduction pour les deux types d'émissions et pour le total. Il est important de noter que ces impacts ne sont pas additionnables. Ils ne sont pas nécessairement les mêmes, lorsque combinés ou appliqués à un modèle autre que celui de référence. Pour cette raison, il est aussi essentiel de créer de nouveaux modèles pour tester les combinaisons de modifications. Ceux-ci sont présentés dans une section subséquente.

## **5.2 Analyse du concept écologique – Modification du design**

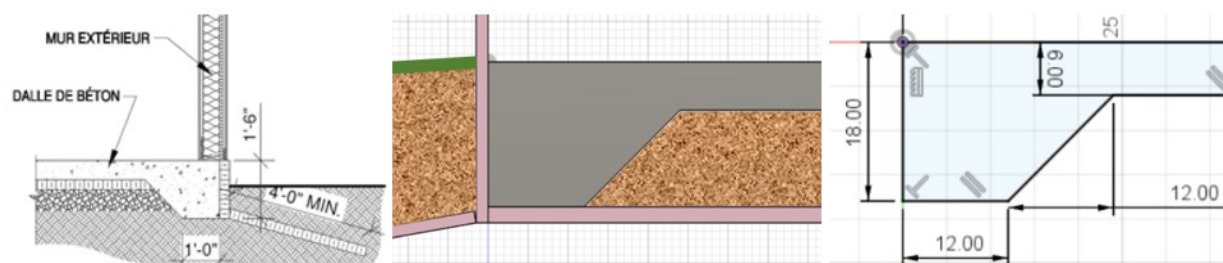
Les modifications dans cette première catégorie touchent au design de la maison. Il s'agit d'affectations majeures aux caractéristiques générales de la maison comme la taille et le nombre d'étages. La maison de référence possède un premier étage doté d'une bonne fenestration

### **5.2.1 Maison à 2 étages**

Comme retrouvé fréquemment dans la littérature, le béton est reconnu comme le matériau qui est responsable de la plus grande quantité d'émission intrinsèque d'une maison. Écohabitation est catégorique

sur la chose, construire une maison sur dalle plutôt qu'avec un sous-sol est une solution efficace pour réduire son empreinte carbone (Écohabitation, 2020a). Selon les résultats d'IE pour la maison de référence, les fondations sont responsables de 15 435 kgCO<sub>2</sub>eq, soit 58% des émissions intrinsèques. La construction d'une maison à deux étages sur dalle monolithique permet d'utiliser beaucoup moins de béton et de conserver la même superficie de plancher habitable. C'est donc une alternative très intéressante à évaluer.

À partir du modèle de référence, les modifications qui suivent sont apportées. D'abord, le sous-sol est remplacé par une dalle monolithique. Les dimensions de la dalle sont inspirées de modèles de Dessins Drummond, un exemple est montré à la figure 5.1.



**Figure 5.1 Dalle monolithique - plan de Dessins Drummond et dimensions de la dalle** (tiré de : Dessins Drummond, 2020)

La partie centrale de la dalle monolithique fait 6 pouce (po) d'épaisseur. On choisit une composante de béton armé plutôt que la dalle, puisqu'on veut y ajouter une armature. L'isolation en polystyrène extrudé est de 2 po sous la dalle et de 1,5 po autour. On en ajoute aussi dans le sol sur 4 pi de large en périphérie.

Le rez-de-chaussée (ou premier étage), identique à celui de la maison de référence, est apposé sur cette dalle directement avec le même plancher. Le deuxième étage, quant à lui, remplace le sous-sol. La division des pièces y est la même. La composition des murs extérieurs imite cependant celle du premier étage. À la place de béton et d'isolant giclé, on a donc plutôt la charpente en bois, la laine isolante et le même revêtement extérieur en déclin de vinyle. Tout le reste est identique au modèle de référence.

Ce modèle utilise les mêmes fenêtres au 2<sup>e</sup> étage que celles du sous-sol dans le modèle de référence soient trois fenêtres de 18 pi<sup>2</sup> au total. Le tableau 5.2 montre que les GES intrinsèques sont diminués de 21% par rapport à la maison de référence, mais que les émissions opérationnelles sont augmentées de 11%. Même si, sur le total, la différence est pratiquement nulle, la distribution des émissions est grandement changée et cela pourrait avoir des effets intéressants lorsque combiné avec d'autres modifications, notamment celles visant à réduire les besoins en énergie.

**Tableau 5.2 Émissions du modèle : maison à 2 étages (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Maison 2 étages</i>	
Émissions intrinsèques	440	346	-21%
Émissions opérationnelles	819	907	+11%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1253</b>	-0%

### 5.2.2 Maison 50% plus petite

Ce modèle sert à montrer l'intérêt de rapetisser la taille de sa maison. Il possède exactement le même premier étage que la maison de référence, mais une dalle monolithique comme celle de la maison à 2 étages. Les résultats obtenus pour ce modèle se comparent à ceux de la maison de référence au tableau 5.3.

**Tableau 5.3 Émissions du modèle : maison 50% plus petite (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Maison 50% plus petite</i>	
Émissions intrinsèques	440	272	-38%
Émissions opérationnelles	819	648	-21%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>921</b>	-27%

On remarque d'abord que les émissions ne sont pas proportionnelles à la taille de la maison, puisqu'une réduction de surface habitable de 50% mène à des réductions globales de 27%. Il est important de noter que, malgré le fait que la taille de la maison soit deux fois plus petite, elle contient quasiment autant de fenêtres que les autres. La qualité des espaces de cette maison n'est donc certainement pas réduite, mais plutôt augmentée en proportion. Un modèle simulant une réduction proportionnelle des fenêtres a plutôt montré des réductions de 41%, 24% et de 30% pour les trois valeurs mesurées. Cette réduction globale, passant de 27% à 30%, indique que ce n'est pas que la quantité de fenêtres qui explique cet écart de proportion. On sait entre autres que les dépenses énergétiques de bases de la maison sont presque les mêmes, peu importe sa taille. L'utilisation des appareils électroménagers, par exemple, ne change pas. Un autre facteur important dans la réduction de la taille d'une maison est l'augmentation de son ratio surface sur volume. Même si le volume est réduit de moitié, les surfaces en contact avec l'extérieur ne le sont pas.

### 5.2.3 Maison de même taille, mais logeant le double d'habitants

Ce modèle ne change rien à la maison de référence, mais fait augmenter le nombre d'habitants de deux à quatre. Les émissions intrinsèques sont les mêmes et les dépenses énergétiques sont légèrement augmentées. Le tableau 5.4 montre les résultats pour ce modèle. Les pourcentages de réduction calculés par habitant sont aussi indiqués entre parenthèses.

**Tableau 5.4 Émissions du modèle : maison logeant deux fois plus d'habitants (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Deux fois plus d'habitants</i>	
Émissions intrinsèques	440	440	0% (-50%)
Émissions opérationnelles	819	928	+13% (-43%)
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1369</b>	<b>+9% (-46%)</b>

Faire vivre deux fois plus de personnes sous un même toit réduit de quasiment la moitié l'empreinte de chacun. Cette solution est donc plus efficace que celle de la maison plus petite, qui est comparable pour la surface habitable par habitant. Réalistement, pour y vivre à quatre adultes, on préférerait sûrement opter pour la maison à deux étages et lui ajouter quelques fenêtres afin d'avoir des espaces offrant une qualité de vie supérieure à celle d'un sous-sol.

### 5.3 Maison durable

Ce modèle tente d'évaluer l'impact de prolonger la durée de vie d'une maison. IE permet de choisir la durée de vie de la maison et le modèle de référence est fixé à 60 ans. Le paramètre de durée de vie est donc simplement changé pour 75 ans, 25% plus durable, avant d'extraire les résultats. Ils sont montrés au tableau 5.5.

**Tableau 5.5 Émissions du modèle : maison plus durable (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Maison 25% plus durable</i>	
Émissions intrinsèques	440	373	-15%
Émissions opérationnelles	819	819	0%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1191</b>	<b>-5%</b>

Cette augmentation de la longévité permet de réduire les émissions intrinsèques de 15% en moyenne annuellement, ce qui impacte le bilan de 5%.

### 5.4 Analyse du concept écologique - Amélioration de l'isolation

Bonifier l'isolation vise à réduire les besoins énergétiques de la maison. Cela augmente généralement aussi la quantité de matériel utilisée et donc les émissions intrinsèques. C'est la balance de ces deux effets qui détermine la pertinence de la mesure.

#### 5.4.1 Ajout de panneaux isolants en polystyrène extrudé

Pour ce modèle, des panneaux de polystyrène d'une épaisseur d'un pouce sont ajoutés à l'isolation de toutes les surfaces extérieures de la maison. Le tableau 5.6 liste les modifications appliquées à ce modèle.

**Tableau 5.6 Modifications apportées au modèle : ajout de panneaux isolants en polystyrène extrudé**

<i>Modifications</i>
<b>Ajout de 1po de polystyrène extrudé sur les surfaces suivantes :</b>
Murs du sous-sol extérieurs
Murs du 1 <sup>er</sup> étage extérieurs
Dalle sous-sol
Toiture

Le tableau 5.7 montre que les émissions totales sont réduites de 2%. Il ne s'agit donc pas d'une mesure très efficace dans le cas de ce type de maison. Le problème réside dans le fait que le polystyrène possède un grand PRP.

**Tableau 5.7 Émissions du modèle : extra polystyrène (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Extra polystyrène</i>	
Émissions intrinsèques	440	465	<b>+6%</b>
Émissions opérationnelles	819	764	<b>-7%</b>
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1230</b>	<b>-2%</b>

#### 5.4.2 Fenêtres haute performance

Pour ce modèle, les fenêtres sont remplacées par des fenêtres haute performance avec triple verre, de l'argon et des films à fenêtre à faible émissivité de type *low-e*. Les différences entre les fenêtres originales et celles aux performances supérieures sont listées au tableau 5.8.

**Tableau 5.8 Différence entre les fenêtres de référence et les fenêtres performantes**

<i>Composante</i>	<i>Référence</i>	<i>Performante</i>
Vitrage	double	triple
Gaz isolant	air	argon
Espaceur	métal	isolé
Films	aucun	<i>low-e</i> (2x)

Ces fenêtres plus volumineuses et contenant plus de matériel possèdent une grande empreinte carbone. Les fenêtres sont cependant l'endroit où la valeur R est la plus faible sur l'enveloppe de la maison et le fait de les améliorer augmente grandement l'efficacité globale. Les résultats au tableau 5.9 montrent que cette mesure est somme toute bénéfique de 4%.

**Tableau 5.9 Émissions du modèle : fenêtres haute performance (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Fenêtres performantes</i>	
Émissions intrinsèques	440	457	<b>+4%</b>
Émissions opérationnelles	819	753	<b>-8%</b>
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1210</b>	<b>-4%</b>

### 5.4.3 Laine plus épaisse

Ce modèle teste l'effet d'augmenter la quantité de laine de verre. Afin d'améliorer l'isolation, cette laine dans le toit et dans les murs extérieurs du premier étage est épaissie. Pour ce faire, la charpente des murs a dû être grossie pour accueillir ce nouveau volume d'isolant en remplaçant les montants de 2x6 po par des montants de 2x10 po. Les modifications sont listées au tableau 5.10.

**Tableau 5.10 Modifications apportées au modèle : laine plus épaisse**

<i>Composante</i>	<i>Modification</i>
Toit	Remplacement laine R30 (9,5 po) pour R40 (11 po)
Murs 1 <sup>er</sup> étage	Changement de l'épaisseur des murs de 6 po à 10 po Remplacement de la laine R20 (6 po) pour R30 (9,5 po)
Solive	Remplacement de la laine R20 (6 po) pour R30 (9,5 po)

Les résultats au tableau 5.11 montrent que cette mesure est efficace malgré l'augmentation de la quantité de laine et de bois, puisque ces matériaux ont de faibles PRP.

**Tableau 5.11 Émissions du modèle : laine plus épaisse (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Extra laine de verre</i>	
Émissions intrinsèques	440	442	<b>+0%</b>
Émissions opérationnelles	819	779	<b>-5%</b>
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1221</b>	<b>-3%</b>

## 5.5 Analyse du concept écologique - Efficacité énergétique

Il existe différents moyens d'améliorer l'efficacité énergétique d'une maison et ils permettent de réduire la demande en énergie électrique et de chauffage.

### 5.5.1 Étanchéité supérieure

Ce modèle est créé en ne changeant qu'un seul paramètre : l'étanchéité globale de la maison. Dans le modèle de référence, l'étanchéité est de 4,55 CAH à un différentiel de pression de 50 Pa. C'est la valeur par défaut donnée par HOT2000 ce qui représente un niveau moyen. Une étude réalisée en 2007 en Ontario montre que la valeur d'étanchéité moyenne des maisons à cette époque était de 7,5 CAH. Les maisons construites aujourd'hui sont plutôt autour de 2,5 CAH à 3,5 CAH. La norme Energy Star requiert

un maximum de 2,5 CAH tandis que le programme canadien R-2000 demande une étanchéité aussi basse que 1,5 CAH (Barrier sciences group, s. d.). Des maisons passives ultras performantes peuvent réussir dans certains cas à atteindre des niveaux impressionnants de 0,6 CAH (Bailes, 2012). On utilise pour ce modèle une étanchéité de 1,5 CAH.

L'étanchéité d'une maison dépend de certaines bonnes pratiques de construction comme découper le pare-air le moins possible, calfeutrer le tour des fenêtres et bien sceller toutes les jonctions entre les murs, les planchers et les fondations (Écohabitation, 2020c). Comme ces techniques requièrent une quantité minimale de matériel, on estime l'impact sur l'énergie intrinsèque comme étant nul.

Le tableau 5.12 montre que l'amélioration de l'étanchéité de la maison de référence est très efficace et réduit les besoins en électricité de 10% à elle seule.

**Tableau 5.12 Émissions du modèle : étanchéité supérieure (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Étanchéité supérieure</i>	
Émissions intrinsèques	440	440	0%
Émissions opérationnelles	819	741	-10%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1181</b>	<b>-6%</b>

### 5.5.2 Appareils et électroménagers efficaces

La consommation d'électricité d'une maison provient, outre le système de chauffage, d'une variété d'appareils dont elle est équipée. Une façon reconnue de réduire sa consommation électrique est d'opter pour des appareils plus efficaces. Il est possible de se procurer des appareils certifiés Energy Star permettant d'assurer une efficacité correspondant à des standards élevés.

Certains appareils électroménagers de base sont déjà relativement efficaces comme le four, la sècheuse ou le réfrigérateur. On peut cependant améliorer significativement les performances d'une laveuse à linge et d'un lave-vaisselle en choisissant un meilleur modèle (Office de l'efficacité énergétique, 2013). D'autres systèmes peuvent être améliorés dans la maison : le débit des robinets, de la douche, les toilettes à bas volume et les lumières à la LED. On peut aussi améliorer la consommation d'électricité extérieure à la maison. Voici, au tableau 5.13, les caractéristiques choisies pour le modèle avec appareils efficaces.



**Tableau 5.13 Modifications apportées au modèle : appareils et électroménagers efficaces**

<i>Caractéristique</i>	<i>Référence</i>	<i>Systèmes efficaces</i>
Débit des robinets	8,3 L/min	3,8 L/min
Débit de la pomme de douche	9,5 L/min	5,7 L/min
Consommation d'eau - laveuse linge	12 gal Imp	9 gal Imp
Consommation d'énergie nominale - laveuse linge	197 kWh/a	145 kWh/a
Consommation d'eau - lave-vaisselle	4 gal Imp	3 gal Imp
Consommation d'énergie nominale - lave-vaisselle	260 kWh/a	240 kWh/a
Nombre de toilettes à bas volume	0	2
Proportion de lumières à la LED ou LFC	<25% (2,6 kWh/j)	>75% (0,60 kWh/j)
Consommation extérieure moyenne	0,9 kWh/j	0,45 kWh/j

Les résultats au tableau 5.14 montrent que cette mesure réduit les besoins totaux en énergie de 6%, ce qui est assez important.

**Tableau 5.14 Émissions du modèle : appareils et électroménagers efficaces (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Électroménagers efficaces</i>	
Émissions intrinsèques	440	440	0%
Émissions opérationnelles	819	767	-6%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1208</b>	<b>-4%</b>

### 5.5.3 VRC et A/C efficaces

D'autres systèmes comme celui de climatisation (A/C) et le ventilateur récupérateur de chaleur (VRC) peuvent être améliorés. Un VRC efficace comme le Broan® HE Series High Efficiency offre des efficacités de 77% et de 66% à 32 °F et -13 °F respectivement (Broan, s. d.). Les valeurs par défaut dans Hot2000 sont de 55% et 45%. Un meilleur système de climatisation peut offrir un coefficient de performance (COP) de 4,5 au lieu de 3 pour un système de base (Comparer 3 Prix Thermopompes, 2019). Les modifications sont résumées au tableau 5.15.

**Tableau 5.15 Modifications apportées au modèle : VRC et A/C efficaces**

<i>Caractéristique</i>	<i>Référence</i>	<i>VRC et A/C efficaces</i>
Efficacité du VRC à 32F	55%	77%
Efficacité du VRC à -13F	45%	66%
Efficacité du climatiseur	COP = 3	COP = 4,5

Les résultats au tableau 5.16 montrent qu'il est possible de réduire la consommation électrique de 5% en appliquant ces mesures au modèle de référence.

**Tableau 5.16 Émissions du modèle : VRC et A/C efficaces (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	Référence	VRC et A/C efficaces	
Émissions intrinsèques	440	440	0%
Émissions opérationnelles	819	782	-5%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1222</b>	<b>-3%</b>

## 5.6 Analyse du concept écologique - Matériaux écologiques

Différents matériaux peuvent remplir la même fonction, dans une construction, tout en possédant des empreintes carbone distinctes. Afin d'améliorer le bilan global de la maison, les matériaux qu'elle utilise sont comparés à des alternatives disponibles sur le marché. Parmi les matériaux qui se substituent le plus facilement, il y a les isolants.

Pour identifier les isolants plus intéressants, ils sont d'abord comparés pour leur potentiel de réchauffement planétaire en kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> et leur capacité d'isolation par épaisseur en R/po. Le meilleur isolant a le plus petit PRP et la plus grande résistance thermique possible. Un nouvel indice, calculé en divisant le PRP par la résistance thermique, permet de comparer les émissions des matériaux pour une même isolation. Cette métrique est présentée en kgCO<sub>2</sub>eq/R10/feuille, ce qui correspond aux émissions associées à une feuille de 4x8 pi, donc de 32 pi<sup>2</sup>, de résistance R = 10. Le tableau 5.17 regroupe les isolants qui peuvent se substituer entre eux. Il y a la catégorie des isolants de type matelas, qui inclut la laine de verre, et celle des isolants rigides incluant le polystyrène extrudé.

**Tableau 5.17 PRP et résistance thermique des différents isolants**

Matériau isolant	PRP	Résistance thermique	PRP / résistance thermique
	kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	R/po	kgCO <sub>2</sub> e/R10/feuille
<b>Isolants sous forme de matelas non-rigide</b>			
Laine de verre R20	2,2	3,6	0,46
Laine de verre R40	1,9	3,6	0,39
Laine de roche R20	46	4,2	8,32
Laine de roche R40	46	4,2	8,32
Polyuréthane giclé (spray foam)	40,4	4,1	7,54
Cellulose soufflée	3,8	3,8	0,76
Chanvre (incl. carbone biogénique)	-22	3,6	-4,64
Paille (incl. carbone biogénique)*	-127	2,4	-39,82
<b>Isolants sous forme de panneaux rigides</b>			
Polystyrène extrudé	138	5,00	20,77
Polystyrène expansé	69	4,6	11,29
Mousse de polyisocyanurate	40	5,8	5,17
Chanvre (incl. carbone biogénique)	-22	3,6	-4,64

\*La paille est affichée au tableau pour référence, le PRP pour ce matériau est incertain.

La majorité des PRP sont tirés d'IE, d'autres n'y étant pas disponibles proviennent de diverses DEP. Pour le chanvre, les valeurs sont basées sur une DEP pour un panneau d'isolation en chanvre fait en République tchèque et sur une étude sur le même genre de panneau réalisée en Italie (EPD International, 2018), (Zampori et al., 2013). Le PRP de la paille est approximé de façon conservatrice à partir de données indirectes utilisées dans d'autres travaux, sa fiabilité n'est néanmoins pas assurée. Son estimation est montrée à l'annexe 1.

Les valeurs pour le ballot de paille et pour le chanvre incluent le carbone biogénique. Le carbone biogénique, c'est le carbone qui est séquestré dans la biomasse lors de la production du matériau biosourcé. On considère cette valeur pour les biomatériaux lorsque la culture de végétaux les constituant a pu reséquestrer du carbone avant leur fin de vie utile. La culture de chanvre ou de paille pousse annuellement et le carbone est stocké dans le matériau pour plusieurs années. On peut ainsi considérer les captations, ou émissions négatives, dans le calcul du PRP. Lorsque les émissions associées au cycle de vie sont inférieures aux émissions négatives issues de la captation, le PRP est négatif. Normalement, plus un matériau est efficace thermiquement, moins de volume de celui-ci est nécessaire, ce qui réduit son empreinte. Le cas des matériaux avec un PRP négatif est particulier puisque plus on utilise un grand volume de ceux-ci, plus ils réduisent l'empreinte carbone.

### 5.6.1 Polyisocyanurate

Le polystyrène est le principal isolant rigide utilisé dans la construction de la maison de référence. Le tableau 5.17 indique que les panneaux de polyisocyanurate sont 2 fois plus efficaces que leur équivalent en polystyrène. Ce modèle substitue tous les panneaux de polystyrène par ceux de polyisocyanurate en ajustant leur épaisseur pour conserver la même valeur R. Les résultats sont montrés au tableau 5.18. Cette substitution assez simple permet une réduction de 5% des émissions intrinsèques.

**Tableau 5.18 Émissions du modèle : polyisocyanurate en remplacement du polystyrène (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Polyisocyanurate</i>	
Émissions intrinsèques	440	420	-5%
Émissions opérationnelles	819	819	0%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1239</b>	<b>-2%</b>

### 5.6.2 Chanvre

Les panneaux de chanvre peuvent autant remplacer les isolants rigides que ceux de type matelas. Voici aux tableaux 5.19 et 5.20 les résultats de la substitution par du chanvre de la laine de verre et du polystyrène.

**Tableau 5.19 Émissions du modèle : chanvre en remplacement de la laine (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Chanvre - remp. de la laine</i>	
Émissions intrinsèques	440	425	-4%
Émissions opérationnelles	819	819	0%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1243</b>	<b>-1%</b>

**Tableau 5.20 Émissions du modèle : chanvre en remplacement du polystyrène (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Chanvre - remp. polystyrène</i>	
Émissions intrinsèques	440	408	-7%
Émissions opérationnelles	819	819	0%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1227</b>	<b>-3%</b>

Malgré le volume de la laine de verre trois à quatre fois plus grand que celui du polystyrène, les gains sont plus intéressants pour le remplacement de ce dernier étant donné son grand PRP. Les dernières analyses montrent qu'il est prioritaire de remplacer le polystyrène.

### 5.6.3 Paille

Les ballots de paille demandent une construction particulière et mènent à des murs 50% plus épais qu'avec la laine de verre pour obtenir la même résistance thermique. Ils ne peuvent donc pas la substituer directement. Connaissant l'impact faible du bois, cette particularité n'est pas tenue en compte dans le calcul. Comme mentionné précédemment, le PRP pour les ballots de paille est estimé indirectement depuis d'autres analyses, sa fiabilité est donc incertaine, tout comme les résultats qui en découlent. Ils sont montrés au tableau 5.21

**Tableau 5.21 Émissions du modèle : paille en remplacement de la laine (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Paille - remp. de la laine*</i>	
Émissions intrinsèques	440	317	-28%
Émissions opérationnelles	819	819	0%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1136</b>	<b>-10%</b>
*Valeur de PRP incertaine			

### 5.6.4 Béton écologique - ajout cimentaire à 25%

Le béton est très polluant, mais il est possible de réduire son empreinte en substituant une portion du ciment par des ajouts tels que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, les fumées de silices ou même de la poudre de verre recyclé (Écohabitation, 2016). Le béton dans IE contient 90% de ciment Portland, le ciment traditionnel, et 10% d'ajout cimentaire. La Maison du développement durable évalué par Équiterre utilisait un ciment composé de 25% de cendres volantes pour réduire son empreinte (Équiterre, 2017). Pour ce modèle, le béton utilisé pour les fondations et la dalle de sous-sol contient aussi

25% d'ajout cimentaire, constitué de 6% de laitier de haut fourneau et de 19% de cendres volantes. Le tableau 5.22 montre les proportions des ajouts cimentaires pour le béton original utilisé dans la maison de référence et pour le béton alternatif

**Tableau 5.22 Modifications apportées au modèle : béton écologique à 25% d'ajout cimentaire**

<i>Ajouts cimentaires</i>	<i>Original</i>	<i>Béton écologique</i>
Ciment Portland	90%	75%
Laitier de haut fourneau	6%	6%
Cendres volantes	4%	19%

L'impact sur l'analyse énergétique est inconnu et est considéré comme nul. Les résultats pour ce modèle sont illustrés au tableau 5.23. La maison de référence, possédant un sous-sol, utilise une grande quantité de béton, ce qui mène à des réductions intéressantes de 8% pour les émissions intrinsèques.

**Tableau 5.23 Émissions du modèle : béton écologique à 25% d'ajout cimentaire (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Béton écologique</i>	
Émissions intrinsèques	440	406	-8%
Émissions opérationnelles	819	819	0%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1225</b>	<b>-3%</b>

## 5.7 Analyse du concept écologique - Meilleures habitudes de consommation

Ce modèle teste l'efficacité d'adopter de meilleures habitudes de consommations au quotidien. Il est possible de réduire la consommation d'électricité notamment en utilisant moins d'eau chaude avec des douches de plus courte durée ou en faisant la lessive à l'eau froide. Il est possible d'éviter d'utiliser la sècheuse à l'occasion et d'assurer que le lave-vaisselle soit utilisé que lorsque vraiment nécessaire. Pour simplifier ce scénario, tous les paramètres associés aux habitudes de consommation sont simplement réduits de 25%, tels que présentés au tableau 5.24. À noter que ce scénario n'inclut pas la modification des températures de chauffage et de climatisation, une autre mesure qui aurait pu être considérée.

**Tableau 5.24 Modifications apportées au modèle : meilleures habitudes de consommation**

<i>Caractéristique</i>	<i>Référence</i>	<i>Efficace</i>
Utilisation des robinets par occupant	1,33 min/occ/j	1 min/occ/j
Durée d'une douche moyenne	6,5 min	4,88 min
Nombre de douches par semaine par occupant	5,2	3,9
Nombre de brassées de lavage par occupant	1,9 brassée/occ/sem	1,43 brassée/occ/sem
Température de l'eau	chaude	froide
Nombre de cycles de lave-vaisselle	1,37 cycle/occ/sem	1,03 cycle/occ/sem
Autre consommation d'eau par occupant	0,642 gal/occ/j	0,482 gal/occ/j
Proportion de brassées séchées à la sècheuse	60%	45%
Autre consommation d'énergie	9,7 kWh/j	7,28 kWh/j
Consommation extérieure moyenne	0,9 kWh/j	0,675 kWh/j
Durée d'utilisation sècheuse	15 min/j	8,27 min/j
Durée d'utilisation ventilateurs salle de bain	72 min/j	54 min/j

Les résultats pour ce modèle sont montrés au tableau 5.25. Des habitudes de consommation 25% moins énergivores entraînent une réduction des émissions opérationnelles de 8% pour la maison de référence et ses deux habitants.

**Tableau 5.25 Émissions du modèle : meilleures habitudes de consommation (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Meilleures habitudes</i>	
Émissions intrinsèques	440	440	0%
Émissions opérationnelles	819	751	-8%
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>1192</b>	<b>-5%</b>

## 5.8 Analyse du concept écologique – Système de chauffage alternatif

La maison de référence utilise le chauffage à l'électricité. Des modèles simulant le chauffage au gaz naturel, au propane, à l'huile ainsi qu'aux granules de bois sont générés afin de mesurer l'impact de leur utilisation comme système de chauffage principal. Les résultats sont présentés au tableau 5.26.

**Tableau 5.26 Émissions des modèles : systèmes de chauffage alternatifs (kgCO<sub>2</sub>eq/a)**

	<i>Référence</i>	<i>Chauffage au gaz naturel</i>	
Émissions intrinsèques	440	440	0%
Émissions opérationnelles	819	3434	<b>+319%</b>
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>3874</b>	<b>+208%</b>

	<i>Référence</i>	<i>Chauffage au propane</i>	
Émissions intrinsèques	440	440	0%
Émissions opérationnelles	819	3854	<b>+371%</b>
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>4294</b>	<b>+241%</b>

	<i>Référence</i>	<i>Chauffage à l'huile</i>	
Émissions intrinsèques	440	440	0%
Émissions opérationnelles	819	4991	<b>+510%</b>
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>5431</b>	<b>+331%</b>

	<i>Référence</i>	<i>Chauffage au bois*</i>	
Émissions intrinsèques	440	440	0%
Émissions opérationnelles	819	6160	<b>+652%</b>
<b>Total</b>	<b>1259</b>	<b>6600</b>	<b>+424%</b>

\*N'inclue pas le carbone biogénique

Les résultats sont impressionnants et illustrent une majeure augmentation des émissions opérationnelles. Il est important de noter que le scénario utilisant les granules de bois ne considère pas le carbone biogénique alors qu'il le devrait, mais cette information n'était pas disponible. Cet aspect est abordé au chapitre des discussions. Même avec le gaz naturel, le moins pire des carburants fossiles, les émissions totales de la maison sont plus de trois fois plus élevées. Il faut aussi prendre compte que les facteurs d'émissions utilisés pour mesurer l'impact de l'utilisation de combustibles fossiles ne prennent en compte que les émissions directes de leur combustion. Avoir eu et utilisé des facteurs représentant toutes les émissions du cycle de vie, comme c'est le cas pour l'électricité, les différences sur les résultats auraient pu être encore plus marquées. Assurer un chauffage à l'électricité est donc de loin la première des priorités pour limiter l'empreinte carbone de son habitation.

Il pourrait être envisagé de produire en partie sa propre électricité en utilisant des panneaux solaires. Les panneaux photovoltaïques ne produisent pas d'émissions lors de leur utilisation, cependant, ils ont des émissions intrinsèques significatives et une durée de vie de 20 à 30 ans (Hydro-Québec, s. d.-a). Leur facteur d'émission est d'environ 64 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, près du double de celui de l'électricité du réseau québécois (Écohabitation, 2021b). Les panneaux solaires sont donc inefficaces pour réduire l'empreinte carbone si le réseau électrique provincial est facilement accessible.

## 6 ANALYSE DES COMBINAISONS DE MODIFICATIONS

L'impact de chaque modification, lorsqu'appliquée individuellement, est maintenant déterminé. Afin de connaître l'effet d'inclure plusieurs d'entre elles à la maison de référence, de nouveaux modèles doivent être générés. En effet, dans la majorité des cas, il n'est pas possible de simplement additionner leurs différents impacts, puisque les modifications affectent des variables qui sont interdépendantes. Les seules exceptions à cette règle sont certaines modifications qui n'ont pas d'effet sur l'analyse énergétique. Par exemple, les effets de l'utilisation du béton écologique et du remplacement des isolants par le chanvre sont additionnables pour la maison de référence. Au contraire, il est évident que l'effet de réduire l'utilisation de la machine à linge dépend de son efficacité.

Avec vingt modifications différentes, le nombre de combinaisons possible est de  $2^{20}$ , soit environ un million. Il est ainsi nécessaire de sélectionner celles qui sont jugées les plus pertinentes. Le tableau 6.1 présente les combinaisons qui sont testées. Elles sont regroupées en deux catégories. La première rassemble les combinaisons pour les modèles de maisons comportant un sous-sol tandis que la deuxième celles pour les modèles de maisons à deux étages sans sous-sol. Certaines sous-combinaisons reviennent dans différents modèles, comme celle de l'isolation maximale ou de l'efficacité énergétique. La colonne de droite indique les modifications qui sont intégrées.



**Tableau 6.1 Combinaisons de modifications apportées à la maison de référence**

<i>Combinaison</i>	<i>Modifications incluses</i>
<b>Combinaisons - incluant un sous-sol</b>	
C0 maison de référence	-
C1 iso. max.	2 + 4.1
C2 iso. max. + eff. éner.	C1 + 3
C3 iso. max. + eff. éner. + habit.	C2 + 5
C4 iso. max. + eff. éner. + chanvre + habit.	C3 + 4.2 + 4.3
C5 iso. max. + eff. éner. + chanvre + béton + habit.	C4 + 4.5
C6 étanche	3.1
C7 eff. éner.	3
C8 eff. éner. + habit.	3 + 5
C9 matériaux alternatifs	4.2 + 4.3 + 4.5
C10 chanvre	4.2 + 4.3
<b>Combinaisons - incluant design à 2 étages (1.1)</b>	
D0 2 étages	1.1
D1 2 étages + iso. max.	D0 + C1
D2 2 étages + iso. max. + eff. éner.	D1 + 3
D3 2 étages + iso. max. + eff. éner. + habit.	D2 + 5
D4 2 étages + iso. max. + eff. éner. + chanvre + habit.	D3 + 4.2 + 4.3
D5 2 étages + iso. max. + eff. éner. + chanvre + béton + habit.	D4 + 4.5
D6 2 étages + étanche	1.1 + 3.1
D7 2 étages + eff. éner.	1.1 + 3
D8 2 étages + eff. éner. + habit.	1.1 + 3 + 5
D9 2 étages + matériaux alternatifs	1.1 + C9
D10 2 étages + iso. max. + étanche	D1 + 3.1
D11 2 étages + iso. max. + eff. éner. + chanvre + béton	D2 + C9
D12 2 étages + iso. max. + eff. éner. + paille + béton + habit.	D3 + 4.2 + 4.3 + 4.4

Un total de 22 combinaisons est modélisé dans les deux logiciels. Dans les deux catégories, les combinaisons de 1 à 5 sont les mêmes et chacune implique une modification de plus que la précédente. Les combinaisons de 6 à 9 sont aussi les mêmes pour les deux catégories, ce qui permet de vraiment bien comparer la maison de référence avec un sous-sol et la maison à deux étages sans sous-sol. Les autres combinaisons sont uniques.

## **6.1 Isolation maximale - C1**

La combinaison de modifications nommée « Isolation maximale », ou C1, simule une maison avec un excellent niveau d'isolation global. Elle regroupe les modifications sous la catégorie 2 (2.1, 2.2 et 2.3) et la modification 4.1. Elle comprend donc plus de panneaux isolants, une charpente épaissie avec davantage de laine de verre et des fenêtres performantes. Elle fait aussi le remplacement du polystyrène par le polyisocyanurate. Avec toutes ces modifications, la résistance thermique des murs de la maison passe de R21,5 à R37,3 Les valeurs R des fenêtres aussi ont presque doublé et le toit est passé de R34 à R45.

## **6.2 Efficacité énergétique – C7 ou 3**

La combinaison intitulée « efficacité énergétique », C7 ou 3, combine les trois modifications de la troisième catégorie (3.1, 3.2 et 3.3). Elle comporte une étanchéité supérieure ainsi que des appareils plus efficaces, incluant les électroménagers, le ventilateur récupérateur de chaleur et le climatiseur.

## **6.3 Matériaux alternatifs – C9**

La combinaison « matériaux alternatifs », ou C9, combine l'utilisation généralisée du chanvre et celle du béton écologique, soit les modifications 4.2, 4.3 et 4.5.

## 7 SOMMAIRE DES RÉSULTATS

Les résultats des modèles comportant une modification individuelle sont compilés au tableau 7.1

**Tableau 7.1 Résultats pour les modifications individuelles apportées au modèle de référence**

Modification	Impact GES annuel (kgCO <sub>2</sub> eq)			
	Intrinsèque	Opérationnel	Total	Impact VS Ref
<b>1 Design</b>	<b>Aug./Dim.</b>	<b>Aug./Dim.</b>		
1.1 Maison deux étages sur dalle	-94	+88	-6	0%
1.2 Maison 50% plus petite, un seul étage	-168	-170	-338	-27%
1.3 Deux fois plus d'habitants - 2 -> 4	-	+110	+110	+9% (-46%)*
1.4 Durée de vie maison 75 ans (+25%)	-68	0	-68	5%
<b>2 Ajout d'isolation</b>	<b>Augmente</b>	<b>Diminue</b>		
2.1 Ajout de panneaux rigides en polystyrène	+25	-54	-29	-2%
2.2 Fenêtres performantes	+16	-66	-49	-4%
2.3 Laine de verre plus épaisse	+2	-40	-38	-3%
<b>3 Efficacité énergétique</b>		<b>Diminue</b>		
3.1 Étanchéité supérieure	-	-78	-78	-6%
3.2 Électroménagers efficaces	-	-51	-51	-4%
3.3 VRC et A/C efficaces	-	-37	-37	-3%
<b>4 Matériaux alternatifs</b>	<b>Diminue</b>			
4.1 Polyisocyanurate	-20	-	-20	-2%
4.2 Chanvre, remplacement de la laine	-16	-	-16	-1%
4.3 Chanvre, remplacement du polystyrène	-32	-	-32	-3%
4.4 Paille, remplacement de la laine	-123	-	-123	-10%
4.5 Béton avec liants écologiques	-34	-	-34	-3%
<b>5 Habitudes de consommation</b>		<b>Diminue</b>		
5.1 Meilleures habitudes de consommation	-	-67	-67	-5%
<b>6 Système de chauffage alternatif</b>		<b>Augmente</b>		
6.1 Chauffage au gaz naturel	-	+2615	+2615	+208%
6.2 Chauffage au propane	-	+3035	+3035	+241%
6.3 Chauffage à l'huile	-	+4172	+4172	+331%
6.4 Chauffage au bois - poêle aux granules**	-	+5341	+5341	+424%
Émissions annuelles totales de la maison de référence :			<b>1259 kgCO<sub>2</sub>eq</b>	
*Valeur pondérée au nombre d'habitants				
**Les émissions du chauffage au bois ne considèrent pas le carbone biogénique, facteur d'émission de NIR.				

Les résultats des modèles comportant une combinaison de modifications sont présentés au tableau 7.2.

**Tableau 7.2 Résultats pour les combinaisons de modifications apportées au modèle de référence**

<b>Combinaison</b>		<b>Impact GES annuel (kgCO<sub>2</sub>eq)</b>			
		<b>Intrinsèque</b>	<b>Opérationnel</b>	<b>Total</b>	<b>Impact VS Ref</b>
<b>Combinaisons - incluant un sous-sol</b>					
C0	maison de référence	-	-	-	-
C1	iso. max.	+6	-177	-170	-14%
C2	iso. max. + eff. éner.	+6	-341	-334	-27%
C3	iso. max. + eff. éner. + habit.	+6	-396	-390	-31%
C4	iso. max. + eff. éner. + chanvre + habit.	-46	-396	-442	-35%
C5	iso. max. + eff. éner. + chanvre + béton + habit.	-80	-396	-476	-38%
C6	étanche	0	-78	-78	-6%
C7	eff. éner.	-	-167	-167	-13%
C8	eff. éner. + habit.	-	-217	-217	-17%
C9	matériaux alternatifs	-82	-	-82	-7%
C10	chanvre	-48	-	-48	-4%
<b>Combinaisons - incluant design à 2 étages (1.1)</b>					
D0	2 étages (2é)	-94	+88	-6	0%
D1	2é + iso. max.	-90	-82	-173	-14%
D2	2é + iso. max. + eff. éner.	-90	-283	-374	-30%
D3	2é + iso. max. + eff. éner. + habit.	-90	-338	-428	-34%
D4	2é + iso. max. + eff. éner. + chanvre + habit.	-153	-338	-491	-39%
D5	2é + iso. max. + eff. éner. + chanvre + béton + habit.	-171	-338	-509	-40%
D6	2é + étanche	-94	-27	-122	-10%
D7	2é + eff. éner.	-94	-115	-209	-17%
D8	2é + eff. éner. + habit.	-94	-166	-260	-21%
D9	2é + matériaux alternatifs	-168	+88	-80	-6%
D10	2é + iso. max. + étanche	-90	-192	-282	-22%
D11	2é + iso. max. + eff. éner. + chanvre + béton	-171	-283	-454	-36%
D12	2é + iso. max. + eff. éner. + paille + béton + habit.	-349	-338	-686	-55%

L'analyse de ces résultats permet de tirer plusieurs conclusions. D'abord, comme l'illustre le tableau des modifications individuelles, c'est le choix du type de système de chauffage qui a, et de loin, le plus grand impact sur les émissions. En effet, changer le chauffage électrique pour un système fonctionnant aux combustibles fossiles peut faire tripler ou quadrupler les émissions globales.

Le fait de réduire la taille de la maison de moitié, une modification demandant évidemment une grande adaptation de la part des habitants, diminue les émissions globales de 27%. Au contraire, conserver la même maison, mais y loger deux fois plus d'habitants diminue les émissions par habitant de 46%. Le constat : il vaut mieux augmenter le nombre d'habitants que réduire la taille de la maison. Autrement dit, en ce qui concerne les GES, la cohabitation remporte sur la minimaison.

Ensuite, toutes les autres modifications individuelles qui ont été testées entraînent des réductions des émissions globales de moins de 10%. Leur efficacité ne peut être évaluée que par cette valeur, puisque certaines modifications ont un rapport de résultat sur investissement plus intéressant que d'autres.

Le modèle à deux étages consiste en une importante modification du design de la maison. Même si son impact global est de 0%, la distribution de ses émissions est considérablement changée. C'est une des modifications les plus intéressantes à tester en combinaison. L'amélioration de l'étanchéité se démarque pour son ratio efficacité sur complexité avec une réduction globale de 6%. En effet, une maison construite intelligemment peut avoir une bonne étanchéité sans trop de matériel supplémentaire. Elle est à prioriser. L'utilisation de matériaux alternatifs peut aussi être intéressante et elle commence par la substitution du polystyrène qui montre une réduction de 2% avec l'usage du polyiso et de 3% avec le chanvre. L'utilisation de béton plus écologique est aussi assez efficace avec 3% de réduction des émissions totales. Le chanvre possède un PRP négatif, cela signifie qu'à chaque épaisseur supplémentaire de cet isolant, les émissions intrinsèques et opérationnelles sont réduites. Il n'y a donc pas de limite à son utilisation concernant le carbone. L'information disponible sur la paille ne permet pas de chiffrer son effet avec certitude, mais, à première vue, elle a un énorme potentiel (B. Thibault, 2019). L'amélioration des habitudes de consommation est pour sa part une mesure particulière, car elle ne coûte que des efforts de la part des habitants, tandis que les autres modifications impliquent généralement un coût monétaire sans avoir d'impact sur le mode de vie. Cette mesure démontre une grande efficacité avec des réductions des GES de 5%.

Il est bien évident que c'est la combinaison de plusieurs modifications qui entraînent des performances intéressantes. Le tableau 7.2 montre que plus il y a de modifications qui sont intégrées, meilleur est le bilan global.

L'interdépendance des variables affecte la pertinence des modifications selon la combinaison dans laquelle elles sont introduites. Le tableau 7.3 montre l'effet de quelques modifications lorsqu'ajoutées les unes après les autres à la maison de référence et à la maison de deux étages.

**Tableau 7.3 Effets des modifications ajoutées à la maison de référence et à la maison à 2 étages**

<b>Modification ajoutée</b>	<b>Impact sur le total (kgCO<sub>2</sub>eq/a)</b>		
	<b>Maison de référence</b>	<b>Maison à 2 étages</b>	<b>Différence</b>
Maison 2 étages	-	-6	-6
Isolation maximale	-170	-167	+3
Efficacité énergétique	-164	-201	-37
Meilleures habitudes de consommation	-56	-54	+1
Chanvre en remplacement de la laine et polystyrène	-21	-62	-42
Béton avec liants écologiques	-65	-18	+47

D'abord, la maison à deux étages émet 6 kgCO<sub>2</sub>eq de moins par année que le modèle de référence. La première modification intégrée à ces deux modèles, l'isolation maximale, a un effet presque identique sur les deux. La deuxième modification, l'efficacité énergétique, est plus bénéfique pour la maison à 2 étages de 37 kgCO<sub>2</sub>eq/a. Cet avantage provient probablement du fait qu'elle est plus sujette aux infiltrations d'air et l'amélioration de l'étanchéité est une solution à cette faiblesse. La troisième modification, s'ajoutant aux deux précédentes, est l'amélioration des habitudes de consommation des habitants. Cette variable réduit les charges énergétiques internes pour les deux modèles et son effet sur leur consommation électrique totale respective est sensiblement le même (-56 et -54). Le remplacement des isolants traditionnels par du chanvre est beaucoup plus avantageux pour la maison à deux étages (-62 contre -21) puisqu'elle en utilise davantage. C'est l'inverse pour le béton écologique utilisé en plus grande quantité pour la maison de référence (-65 contre -18). Il est bon de rappeler que ces valeurs seraient possiblement différentes si l'intégration des modifications était faite dans un ordre différent, mais le total resterait évidemment le même.

Cette étude permet de quantifier les effets de certains concepts écologiques appliqués à une maison unifamiliale. Les petites modifications appliquées individuellement réduisent de peu les émissions totales de l'habitation. En combinant plusieurs d'entre elles, il est toutefois possible de retrancher quelques dizaines de points de pourcentage du bilan global. En somme, sans réduire la taille de l'habitation ou la qualité de vie qu'elle offre, il est possible, avec les moyens identifiés, de réduire les émissions de celle-ci d'un ordre de grandeur pouvant aller jusqu'à 40%. Ainsi, les émissions moyennes annuelles de la maison de référence sont réduites de 1 259 kgCO<sub>2</sub>eq à 750 kgCO<sub>2</sub>eq. Cela correspond à une réduction des émissions individuelles pour chacun de ses habitants de 254 kgCO<sub>2</sub>eq/a.

Selon cette étude, les émissions associées à l'habitation ne représentent qu'environ 4% de l'empreinte carbone individuelle d'une personne québécoise moyenne. Les bénéfices pour l'individu restent donc très faibles. Même avec une maison intégrant une multitude de concepts écologiques, le québécois ne pourra pas améliorer son impact climatique de plus de 2%. Il pourra considérer cette solution uniquement comme étant complémentaire à d'autres.

## 8 DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Les sections précédentes du travail ont mené à des résultats quantitatifs et concrets démontrant l'impact carbone qu'a l'intégration de certains concepts écologiques à la maison de référence. Pour permettre de brosser un portrait clair et complet de la situation, d'autres aspects entourant ces résultats doivent être abordés. Le présent chapitre vise d'abord à présenter les limites et les contraintes de ce travail et comment elles affectent les résultats. Elles déterminent d'une part le cadre d'applicabilité des résultats, c'est-à-dire comment ils peuvent être utilisés concrètement, extrapolés ou transposés à d'autres situations. Elles impactent d'autre part la fiabilité et la précision des résultats obtenus ainsi que leur niveau de complétude. À la lumière de l'ensemble du travail, il est finalement possible d'émettre des recommandations concernant la méthode employée pour quantifier les émissions puis des recommandations pour les citoyens québécois visant à réduire leur empreinte carbone. Une réflexion allant au-delà du contexte de l'habitation permet aussi de formuler des recommandations plus générales sur la réduction de l'empreinte carbone individuelle.

### 8.1 Cadre d'applicabilité

Le but de ce travail est d'informer les citoyens québécois sur les meilleures solutions permettant de réduire l'empreinte carbone de leur habitation. C'est pour cette raison que le modèle de référence tente de représenter le mieux possible la maison québécoise moyenne. Cependant, les habitations sont très variées dans leur type, leur taille, dans les systèmes qu'elles utilisent et dans les matériaux qui les constituent. Les résultats obtenus ne sont pas parfaitement transposables d'une habitation à l'autre, tel que l'explique l'interdépendance des variables qui définissent une maison.

L'aspect le plus important du cadre d'applicabilité est le contexte québécois. Les résultats obtenus et les recommandations qui en découlent ne peuvent s'appliquer qu'à un endroit où le facteur d'émission de l'électricité s'apparente à celui du Québec. Ailleurs, comme en Alberta ou en Saskatchewan, où les combustibles fossiles produisent la majorité de l'électricité, le facteur d'émission pour électricité est au moins 20 fois supérieur à celui du Québec (ECC, 2021). Les résultats, pour une maison en ces territoires, seraient tout autres.

Ce projet n'a évidemment pas pu évaluer la sensibilité de toutes les variables. L'analyse de combinaisons permet d'agrandir le cadre, mais encore plusieurs autres pourraient être évaluées. Les impacts qu'auraient les modifications testées sur des maisons qui sont, par exemple, non-rectangulaires, orientées différemment, moins protégées du vent ou de taille différente ne sont donc pas connus. C'est principalement la contrainte de temps qui restreint le nombre d'analyses et ainsi les limites de l'applicabilité des résultats.

Sans les avoir mesurées précisément, il est néanmoins possible d'estimer l'influence de certaines variables. Par exemple, les principes de transfert de chaleur permettent de comprendre que l'énergie

thermique qu'une maison devra générer pour tempérer sa zone habitable est relative à ses pertes et gains de chaleur. Les quatre modes de transfert de chaleur sont l'advection, la conduction, la convection et la radiation. On sait que les pertes par conduction varient linéairement avec la température extérieure, le niveau d'isolation et les grandeurs des surfaces de l'enveloppe de la maison, comme le montre l'équation à la figure 8.1.

$$(2) \quad \dot{Q} = k \cdot A \cdot dT$$

Where:  
 $\dot{Q}$  = Energy flow [W]  
 $k$  = Overall heat transfer coefficient [W/(m<sup>2</sup>·°C)]  
 $A$  = Heat transfer area [m<sup>2</sup>]  
 $dT$  = Temperature difference [°C]

**Figure 8.1 Équation de transfert de chaleur par conduction thermique** (tiré de : SWEPE, s. d.)

Si la superficie de l'enveloppe de la maison est doublée, par exemple en changeant sa forme ou sa taille, ses pertes thermiques par conduction le sont aussi. L'effet est le même pour les pertes par convection et par radiation qui sont aussi directement proportionnelles aux surfaces. Les pertes par advection sont associées aux échanges d'air à travers cette enveloppe et elles risquent de varier sensiblement de la même façon pour une qualité d'étanchéité équivalente. On estime donc dans ce cas qu'une maison avec deux fois plus de surfaces en contact avec l'extérieur consommera environ deux fois plus d'électricité. Il faudrait bien sûr aussi considérer les charges internes, mais l'ordre de grandeur est concevable. Pour ces mêmes raisons, on peut prévoir qu'une habitation minimisant ses surfaces extérieures par rapport à son volume habitable sera plus efficace énergétiquement, ce qui est le cas des habitations multilogements.

Les réductions d'émissions associées à la substitution de matériaux sont aussi facilement extrapolables. En effet, il est évident que les émissions intrinsèques des matériaux sont essentiellement proportionnelles à leur quantité.

En faisant preuve de jugement, il est donc possible d'extrapoler les résultats à une habitation légèrement différente du modèle de référence. Il faut cependant comprendre l'impact qu'ont les variables sur les résultats.

## **8.2 Facteurs affectant la précision et la fiabilité**

L'ACV est un travail complexe et de grande envergure. La fiabilité, la précision et la complétude des résultats dépendent de plusieurs facteurs. Dans le cadre de cette étude, les facteurs limitants sont notamment la contrainte de temps, les limites de connaissances, d'accessibilité aux données et de



précision des données utilisées. Cette section aborde ces différents facteurs limitants et en explique leurs effets sur les résultats.

### **8.2.1 La précision du facteur d'émission de l'électricité québécoise**

Tel que présenté précédemment, le facteur d'émission de l'électricité considéré dans le cadre de ce travail, pour le calcul des émissions opérationnelles, est de 34,5 gCO<sub>2</sub>eq/kWh. C'est la nouvelle valeur à utiliser depuis sa réévaluation à la hausse de 67% en 2021. Elle est aussi 23 fois plus grande que celle servant aux inventaires GES suivant la norme ISO 14064 qui est de 1,5 gCO<sub>2</sub>eq/kWh. Ce facteur d'émission a un effet directement proportionnel sur les émissions opérationnelles d'une maison chauffée à l'électricité. Les résultats de cette étude dépendent donc grandement de celui-ci et il est important de bien le choisir.

Le choix de ce facteur d'émission, tout comme le choix de l'ensemble de la méthode, est fait en fonction des objectifs du projet. Tout comme il est raisonnable, dans le cadre d'un inventaire GES, de choisir un facteur de 1,5 pour des fins de faisabilité et de cohérence, différentes raisons justifient le choix du facteur de 34,5 pour cette analyse.

Le but de ce travail est d'obtenir des résultats qui soient, autant que possible, fidèles à la réalité. C'est pourquoi un maximum d'émissions associées à la construction et l'utilisation de la maison est considéré. C'est exactement ce que permet l'ACV et c'est pourquoi Hydro-Québec prescrit ce facteur de 34,5 gCO<sub>2</sub>eq/kWh pour ce genre d'exercice. C'est un facteur plus ou moins précis, mais il représente beaucoup plus exactement l'impact qu'a réellement l'utilisation d'électricité. Bien qu'il soit prescrit, il peut tout de même être sage de le remettre en question. Par exemple, il serait pensable que, les barrages étant déjà construits, la consommation d'électricité n'émette pas réellement autant de GES que le facteur d'émission le suggère. Cependant, l'augmentation de la demande en électricité à travers la province justifierait possiblement la création de nouveaux barrages qui engendreraient de nouvelles émissions. Au contraire, si la demande était réduite, le surplus d'électricité pourrait être exporté et réduire la production d'électricité ailleurs. Il est donc raisonnable d'affirmer que ce facteur soit, selon les connaissances actuelles, le plus représentatif de la réalité pour évaluer les émissions d'une maison. Il demeure important de garder à l'esprit que sa faible précision diminue la certitude attribuable au total des émissions opérationnelles.

### **8.2.2 La fiabilité des PRP**

Les émissions intrinsèques découlent directement des PRP et ceux qui sont tirés de plus d'une trentaine de DEP. La grande majorité provient de la banque de données du logiciel IE et, même si celui-ci indique vaguement ses sources, il est souvent impossible de retracer leurs origines. L'exactitude et la précision des PRP qu'IE utilise sont donc difficiles à valider. Ce logiciel très connu au Canada et employé par plusieurs entreprises reste néanmoins une des meilleures options disponibles à ce jour.

Les PRP issus d'IE et de sources externes ont été comparés pour certains matériaux importants. Il est possible dans IE de faire une analyse pour un seul matériel afin de découvrir son PRP. Pour le bois, les valeurs des PRP dans IE semblent se rapprocher de celles trouvées dans les DEP du Canadian Wood Council pour l'Amérique du Nord (« Canadian Wood Council », s. d.). Il a même été constaté après quelques tests que IE adaptait la valeur de son PRP en fonction du territoire choisi pour la maison. Cela explique probablement l'écart de 79% retrouvé entre le PRP pour les phases A1-A3 dans IE pour Montréal et celui représentant la moyenne nord-américaine dans le DEP. Cet exercice augmente la confiance en la fiabilité des PRP utilisés par IE pour le bois.

Pour le polystyrène extrudé, un écart impressionnant fut constaté. Le DEP de la compagnie fabricant le commun polystyrène extrudé de couleur rose, Owens Corning, affiche un PRP des phases A-C de 1 847 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> pour son produit le plus populaire (« Owens-Corning\_EPD\_FOAMULAR-XPS-Insulation-2020.pdf », s. d.). IE donne pour sa part un PRP de 146 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> pour ce matériau, soit une valeur 12,7 fois moins grande. Même en comparant les PRP des phases A1-A3, la différence est tout de même de 5,1 fois. Il a aussi été constaté que les PRP d'IE ne sont pas affectés par la localisation de la maison (pour New York, Los Angeles ou pour toutes les États-Unis). Le DEP d'Owens Corning, déclare pour sa part l'Amérique du Nord comme marché d'applicabilité. La raison de cette différence demeure inconnue et il est difficile de choisir une des deux valeurs. La valeur d'IE a été choisie pour ce travail, mais ce matériel n'aurait toutefois pas fait partie des solutions indépendamment du PRP choisi.

Ce genre d'incohérence peut se retrouver pour d'autres matériaux, mais les PRP utilisés par IE n'ont pas tous pu être validés. Ces inexactitudes ou imprécisions affectent la fiabilité des résultats obtenus pour les émissions intrinsèques.

### **8.2.3 La fiabilité des logiciels**

Certains bogues ont été expérimentés avec les deux logiciels de modélisation. Par exemple, HOT2000 change son résultat pour la ventilation lorsque le logiciel est fermé puis rouvert. En ouvrant le modèle, il faut aller cliquer dans une des cases des paramètres de ventilation et, même sans changer les valeurs, les résultats changent. Heureusement ce bogue a été identifié et l'erreur n'affecte pas les résultats. Un autre bogue a été identifié, cette fois-ci avec IE. Quand le toit en tôle d'acier est choisi, IE ajoute dans l'inventaire des matériels le « #15 Organic Felt » au lieu du « Metal Roof Cladding – Residential (30 Ga.) ». Le premier est en fait un bardeau fait à base de matière organique et possède un très faible PRP. Les émissions des phases A1-A3 pour le premier sont de 45 kgCO<sub>2</sub>eq tandis que, pour le toit en acier, elle serait en réalité de 1930 kgCO<sub>2</sub>eq pour les 1008 pi<sup>2</sup> du toit de la maison. Cela a pour effet que IE sous-estime grandement l'influence sur les émissions de choisir un toit d'acier. Pour cette raison, il a été décidé que cette option ne serait pas évaluée dans le cadre de cette étude.

Ce genre de bogue est découvert en analysant le détail des résultats de multiples scénarios. Il serait beaucoup trop long de valider la fiabilité des logiciels sur tous les paramètres et il est probable que d'autres erreurs de ce genre soient présentes dans les calculs. Il s'agit d'une autre source d'erreur qui peut affecter la fiabilité des résultats finaux.

#### **8.2.4 Les choix arbitraires**

Plusieurs choix jugés de peu d'importance ont été faits arbitrairement. Pour la majorité d'entre eux, leur sensibilité n'a pas été évaluée. Or il est impossible de savoir leur réelle influence sur les résultats. En investissant plus de temps, il serait possible d'en évaluer plus et ainsi de diminuer la marge d'erreur potentielle. Par exemple, il existe différents types de chevrons de toit, un seul a été choisi dès le départ et aucun autre n'a été testé. Dans HOT2000, une multitude de paramètres sont déjà sélectionnés par défaut et certains sont laissés tels quels simplement parce qu'il n'a pas été possible de prendre le temps de tous bien les analyser.

#### **8.2.5 La difficulté de la validation**

La comparaison avec d'autres études est une méthode de validation qui peut permettre d'augmenter la fiabilité des résultats. Il n'est cependant pas pertinent de comparer les résultats de deux ACV sans connaître les fins détails de leur méthodologie, car ces détails impactent sérieusement les résultats. Les études d'ACV de maison qui sont partagées manquent souvent d'information et ne permettent donc pas une comparaison avec ce travail. L'étude avec laquelle la maison de référence tente de se comparer au chapitre 4 utilisait aussi IE. Toutefois, cette publication ne mentionne pas comment elle évalue l'énergie consommée, quel facteur d'émission est utilisé, ni même la taille de la maison. Elle semble aussi considérer la phase D dans IE, mais ce n'est également pas précisé. Aucune autre étude n'a pu être identifiée pour vraiment comparer et valider les résultats. En revanche, au moins certains aspects, comme la consommation d'électricité, ont pu être validés en comparant avec d'autres sources.

### **8.3 Complétude**

Comme mentionné un peu plus tôt, la contrainte de temps du projet a limité le nombre scénarios qu'il a été possible d'évaluer. Plusieurs autres concepts écologiques, modifications et combinaisons de celles-ci auraient pu être pertinents à évaluer. En y investissant plus de temps, ce travail pourrait donc être approfondi de plusieurs façons et ainsi rendre les résultats plus complets. D'autres limites et contraintes du projet affectent également le niveau de complétude des résultats.

L'accessibilité restreinte des données est un des facteurs limitant le niveau de complétude du projet. Pour certains matériaux, les PRP sont difficiles à trouver et ceux qui sont disponibles ne sont parfois pas assez bien contextualisés pour les considérer comme suffisamment fiables. Les PRP peuvent être déterminés

pour un autre pays, c'est le cas du PRP trouvé pour le chanvre, il est alors difficile d'évaluer son applicabilité pour le Québec. Il a été possible de repérer plusieurs sources discutant du PRP du ballot de paille, mais aucune n'explique clairement les émissions considérées. La possibilité d'évaluer les scénarios repose donc sur de la disponibilité des données.

Les logiciels, quoique très utiles, possèdent évidemment leurs limites et ne peuvent simuler l'entièreté des paramètres d'une maison. Par exemple, HOT2000 ne peut considérer la masse thermique de matériaux en particulier. Il ne permet pas non plus de simuler le fait que les rideaux, les toiles ou les stores peuvent être fermés pour bloquer l'entrée du soleil durant les journées chaudes. IE pour sa part ne permet pas d'inclure des recouvrements de plancher et plusieurs autres composantes d'une maison. Ces limites de logiciels affectent l'exactitude des simulations, mais aussi le nombre de possibilités et donc la complétude du travail.

## **8.4 Recommandations**

Comme il vient d'être présenté, plusieurs limites peuvent complexifier l'interprétation des résultats de ce travail. Malgré celles-ci, il demeure possible de tirer des conclusions assez évidentes et d'apporter des recommandations aux propriétaires, futurs propriétaires ou aux citoyens québécois en général curieux de comprendre comment réduire leurs émissions.

### **8.4.1 Recommandations concernant la méthode**

Avant de présenter les recommandations pour la réduction des émissions, voici des recommandations concernant la méthode employée pour ce travail.

La première recommandation, s'appliquant à l'exercice général des ACV, consiste en la considération du facteur temporel dans les analyses. Le facteur temps est important, car l'urgence climatique exige de grandes réductions d'émissions durant les prochaines décennies. La durée de vie d'une maison dépasse les 50 ans et la méthode actuelle considère les émissions étalées proportionnellement sur chaque année de sa vie. Pourtant, la grande majorité des émissions intrinsèques sont relâchées dans l'atmosphère avant la construction de la maison. Le carbone stocké dans les matériaux de la maison n'est pas réémis dans l'atmosphère avant la déconstruction de la maison. Les PRP pour les matériaux biosourcés, spécialement le bois, considèrent l'aspect biogénique sans nécessairement prendre en compte le temps que peut prendre une forêt à repousser après sa coupe. Un aspect similaire peut être négligé lorsqu'on considère comme carboneutre l'utilisation, pour le chauffage, de bois mort voué à la décomposition. Le facteur d'émission de l'électricité est largement influencé par les émissions biogéniques dues à l'enneigement des terres lors de la construction de barrages hydroélectriques. Ces émissions ne se produisent sans doute pas exactement au moment où la consommation électrique a lieu. L'ACV dynamique est une approche

alternative qui prend en compte les horizons temporels des émissions et elle devrait être intégrée dans les pratiques modernes afin d'améliorer la pertinence des analyses (CIRAIG, 2010).

La deuxième recommandation concernant la méthode vise à éviter des pertes de temps. Pour cette étude, il fallait créer une grande quantité de modèles contenant de petites différences. Pour ce faire, plutôt que de systématiquement recréer un nouveau modèle, il convenait de partir du modèle de référence et d'y ajouter les modifications voulues. Pour cette raison, il est recommandé pour ce genre d'exercice de s'assurer de créer le modèle de référence le plus complet possible avant de générer les modèles alternatifs. Autrement, beaucoup de temps doit être investi pour apporter la même modification à chacun d'entre eux lorsque nécessaire.

Finalement, plein d'autres aspects pourraient améliorer la qualité du travail : l'amélioration des logiciels pour les rendre plus complets et plus fiables, l'amélioration des PRP par de nouvelles ACV, etc. C'est une science relativement récente et en développement. La continuation de la recherche permettra certainement d'améliorer la précision des résultats des études à venir.

#### **8.4.2 Recommandations concernant les émissions de la maison**

Les solutions dans la minimisation de l'empreinte carbone de l'habitation sont partiellement implicites ou décrites dans le sommaire des résultats. Il en découle néanmoins des recommandations plus concrètes.

La première solution dans la minimisation de l'empreinte carbone de son habitation est de s'assurer d'opter pour un système de chauffage électrique. Comme il a été constaté, l'utilisation d'un système fonctionnant aux énergies fossiles triple ou quadruple l'empreinte globale de la maison chauffée uniquement à l'électricité. Cette conclusion est particulière au Québec qui jouit d'une électricité des plus propres. En ce contexte, c'est le seul critère qui influence les émissions dans cet ordre de grandeur. Le réseau électrique québécois est si peu émetteur qu'il rend même impertinente l'utilisation de panneaux solaires. De plus, il est facile de déduire que, dans le cas où l'utilisation d'un système de chauffage aux énergies fossiles serait inévitable, il faudrait à tout prix minimiser les besoins en énergie, quitte à augmenter les émissions intrinsèques.

Toutes les autres modifications présentées ont un effet relativement mince. Il peut donc être intéressant d'en sélectionner plusieurs. Les plus intéressantes pour le consommateur seront celles qui pourront être intégrées sans trop de difficulté ou sans trop de coûts. Étant donné que l'aspect financier est généralement le plus restrictif, la stratégie pourrait être de choisir les options qui offrent le meilleur rapport de réduction d'émission sur les coûts. La personne pourrait donc se baser sur le tableau des résultats et sur des estimations budgétaires pour sélectionner la combinaison qui lui semble optimale pour sa situation.

Ce travail n'évalue strictement que les impacts sur les émissions de GES. Évidemment, afin de faire un choix éclairé, il est essentiel de récolter de l'information sur les autres facteurs décisionnels. On peut prendre en compte, au-delà des GES et de l'aspect financier : les autres impacts environnementaux, l'impact sur la qualité de vie et sur la santé, l'aspect fonctionnel, les impacts sociaux et bien plus. Les solutions doivent aussi s'adapter aux situations. Par exemple, une dalle monolithique se pose bien sur le roc et évite de gros frais de dynamitage associés au creusage d'une cave, mais elle demande d'importants travaux de nivellement si le terrain est en pente.

En combinant plusieurs modifications, il est possible de réduire significativement l'empreinte carbone de l'habitation, voire de la réduire de presque la moitié. Étant donné que la maison de référence est déjà relativement peu émettrice de GES, une moitié de réduction correspond à plus ou moins 250 kgCO<sub>2</sub>eq par personne annuellement. Comparé à l'empreinte totale du québécois moyen qui s'élève aux environs de 15 000 kgCO<sub>2</sub>eq/a, c'est moins de 2% de réduction du bilan carbone individuel. Dans un monde où les autres émissions individuelles auront déjà été réduites significativement, cette contribution pourrait devenir plus intéressante.

#### **8.4.3 Réflexion et recommandations générales**

Rappelons que la motivation derrière ce travail est la lutte aux changements climatiques. C'est pourquoi son but ultime est de fournir, aux citoyens québécois, de l'information qui pourra les aider à prendre les meilleures décisions dans la réduction leur empreinte carbone personnelle.

Les mesures pour réduire l'empreinte carbone de l'habitation sont bien identifiées dans cet essai et sont parmi les solutions envisageables pour l'individu. Il reste que le constat le plus marquant qui ressort de cette analyse est la faible portion qu'occupent les émissions de la maison de référence dans les émissions totales individuelles des Québécois. Si le but d'une personne est de réduire son empreinte carbone totale, elle doit prioriser ses actions en conséquence. Pour cette raison, il est intéressant de pousser la réflexion un peu plus loin et d'analyser les résultats dans un cadre plus élargi.

Un des problèmes en environnement est l'inefficacité. Dû principalement à la complexité de cette science, les gens bien intentionnés n'ont généralement pas connaissance de la grandeur des impacts de chaque action. Comme mentionné en introduction, une multitude de solutions sont bien connues, mais il est difficile de comparer leurs efficacités. Les gens finissent donc par en adopter quelques-unes presque aléatoirement et, y mettant beaucoup d'effort, ils considèrent faire leur part. Passant à côté de l'important maillon qu'est la quantification, les efforts sont souvent improductifs.

En plus de la difficulté à identifier de l'information fiable et pertinente, personne n'est à l'abri des biais cognitifs et ceux-ci s'avèrent fréquents lorsqu'une situation de haute complexité dépasse le raisonnement.

Ne serait-ce qu'inconsciemment, les solutions qui menacent les privilèges d'une personne sont souvent minimisées par celle-ci. Cette astuce du cerveau humain lui permet de protéger ses intérêts tout en lui donnant bonne conscience. Un amoureux de plein air peut revendiquer fermement, au nom de l'environnement, l'importance de ne laisser aucun déchet en forêt tout en parcourant des centaines de kilomètres par semaine en voiture pour aller profiter de la nature.

Un citoyen consciencieux et désirant sérieusement réduire son empreinte carbone doit se centrer sur son bilan total. Il doit s'intéresser aux grandeurs de ses différentes émissions afin d'identifier les potentiels de réduction qui sont signifiants. C'est crucial, puisque certaines mesures sont des dizaines de fois plus efficaces que d'autres. Intuitivement, il peut être amené à penser que « chaque petit geste compte », mais ce type de raisonnement souffre d'un grand manque de rigueur. En environnement, et spécifiquement dans le domaine des émissions de GES, il faut plutôt penser « deux poids, deux mesures ». Il faut donc toujours relativiser et mesurer l'impact des actions sur le bilan global. Dans cette logique, le besoin de bien quantifier les différentes émissions se justifie.

Pour revenir aux résultats de cette étude, les modèles de la maison de référence donnent 440 kgCO<sub>2</sub>eq/a d'émissions intrinsèques et 819 kgCO<sub>2</sub>eq/a d'émissions opérationnelles. En augmentant les émissions intrinsèques de 32%, pour prendre compte notamment des autres travaux associés à une propriété, une valeur plus conservatrice d'exactly 1400 kgCO<sub>2</sub>eq/a est obtenue pour les émissions totales de la maison. Un citoyen québécois, vivant à deux personnes dans un bungalow de 2000 pi<sup>2</sup> chauffé à l'électricité, peut ainsi estimer que son habitation contribue pour environ 0,7 tCO<sub>2</sub>eq de son empreinte globale annuelle. Le mini scénario suivant met en perspective cette valeur parmi d'autres activités hypothétiques de cette personne.

Si l'habitant de cette maison possède un véhicule consommant 9 L aux 100 km et qu'il parcourt 25 000 km/a avec celui-ci, environ 5,5 tCO<sub>2</sub>eq/a sera émis par la consommation d'essence seulement. S'il prend un vol aller-retour Montréal-Paris, il peut compter environ 1,9 tonne de plus dans son bilan global (Nathan, 2018). Comme vu précédemment, son alimentation représente surement autour de 2,5 tonnes. Les données de l'étude l'Université de Calgary indiquent aussi qu'un 1,6 tonne par personne est émis par les services gouvernementaux, incluant les écoles et les hôpitaux (Fellows et Dobson, 2017). S'il est considéré que cet individu émet autant que la moyenne québécoise, soit environ 15 tonnes annuellement, voici au tableau 8.1 ce que ces derniers chiffres représenteraient en proportion.

**Tableau 8.1 Proportion des émissions d'un citoyen québécois**

<i>Source</i>	<i>Qté</i>	<i>Proportion</i>
Maison	0,7	5%
Essence de la voiture	5,5	37%
Vol d'avion Montréal-Paris	1,9	13%
Alimentation	2,5	17%
Services gouvernementaux	1,6	11%
Autres	2,8	19%
<b>Total</b>	<b>15</b>	

Maintenant, si cette personne est sérieusement engagée envers la planète, elle sait qu'elle doit se doter d'objectifs de réduction ambitieux. L'Organisation des Nations Unies (ONU) cible des émissions mondiales de 5,8 tCO<sub>2</sub>eq/a par personne pour 2030, dans ses projections visant à limiter l'augmentation de la température globale à 2 °C (Shrink That Footprint, 2012). Les étapes suivantes montrent quelle pourrait être son approche si elle voulait réduire son empreinte carbone de moitié, soit de 7,5 tCO<sub>2</sub>eq/a.

Premièrement, l'individu concerné doit identifier les plus importants émetteurs et surtout ceux qui ont les plus grands potentiels de réduction. La consommation d'essence de sa voiture est de loin le premier aspect à adresser. En vivant en ville, ou en choisissant une combinaison résidence-travail qui ne lui demande pas de parcourir de longues distances chaque jour, il est réaliste de croire qu'il pourrait s'en sortir avec 10 000 km annuellement. Alternativement, il peut covoiturer ou utiliser les transports durables. Ce changement implique une réduction de 3,3 tCO<sub>2</sub>eq/a. Au lieu d'aller en Europe, il pourrait décider de voyager localement avec sa voiture sur 2000 km avec un autre passager pour sauver près de 1,7 tCO<sub>2</sub>eq/a (un aller-retour Sherbrooke-Percé émet environ 10 fois moins qu'un aller-retour Montréal-Paris pour deux personnes). Un régime végétarien émet environ la moitié des émissions d'un régime moyen (Veeramani et al., 2017). Une réduction de 1,3 tonne est donc estimée pour cette sphère. Pour son habitation, il opte pour une combinaison performante lui épargnant 0,2 tCO<sub>2</sub>eq/a (32% des émissions de la maison). Le tableau 8.2 montre les réductions associées à l'ensemble de ces mesures.

**Tableau 8.2 Réductions d'émissions associées aux mesures proposées (tCO<sub>2</sub>eq/a)**

<i>Source</i>	<i>Qté</i>	<i>Avant</i>	<i>Qté</i>	<i>Après</i>	<i>Proportion</i>
		<i>Proportion</i>		<i>Différence</i>	
Maison	0,7	5%	0,5	-0,2	-1,3%
Essence de la voiture	5,5	37%	2,2	-3,3	-22,0%
Vol d'avion Montréal-Paris	1,9	13%	0,2	-1,7	-11,3%
Alimentation	2,5	17%	1,2	-1,3	-8,7%
Services gouvernementaux	1,6	11%	1,6	0	0,0%
Autres	2,8	19%	2,8	0	0,0%
<b>Total</b>	<b>15</b>		<b>8,5</b>	<b>-6,5</b>	<b>-43,3%</b>



Il aurait ainsi presque atteint son objectif avec celles-ci. Les chiffres illustrent que les modifications sur sa maison jouent un moindre rôle dans sa solution globale. Pour relativiser, les réductions associées à son habitation équivalent à 900 km parcourus avec sa voiture, seulement pour l'essence.

La conclusion de cet exercice est qu'il est impossible d'obtenir des gains intéressants sans s'attaquer aux transports. Une étude du CIRAIG montre que les émissions d'une voiture conventionnelle parcourant 15 000 km/a pendant 10 ans sont de 4,3 tCO<sub>2</sub>eq par année. En comparaison, la voiture électrique émet dans les mêmes conditions 1,8 tCO<sub>2</sub>eq/a, soit 65% moins (CIRAIG, 2016). L'électrification des transports est donc très pertinente au Québec au point de vue des GES et peut être une solution alternative ou combinée aux réductions des distances parcourues. Basées sur ces données, les modifications réduisant les émissions de la maison de 0,4 tCO<sub>2</sub>eq/a (0.2 par personne) équivalent à environ 1 700 km parcouru en voiture électrique. Les profits de rendre sa maison écologique reste donc peu signifiant, même en ayant une voiture électrique.

En adaptant son mode de vie, comme en décidant de vivre en ville, une personne peut presque totalement éliminer ses émissions reliées au transport. En visitant son pays en voiture, elle peut éviter de prendre l'avion. Au contraire, d'autres émissions peuvent être réduites ou améliorées, mais pas complètement éliminées. Il sera toujours nécessaire de se nourrir et de vivre sous un toit. Cette réalité met en lumière le fait que le potentiel de réduction ne dépend pas que de la grandeur de l'émission. Modifier son alimentation peut malgré tout rester cinq fois plus efficace que de modifier sa maison (-0,2 contre -1,3 dans l'exemple). Être végétarien une fois sur cinq est donc aussi pertinent que de se construire une maison super écologique.

La part des services gouvernementaux est illustrée au tableau 8.2 pour donner en exemple certaines émissions sur lesquelles l'individu n'a pas de contrôle direct. Ce dernier peut cependant avoir des impacts indirects en revendiquant la responsabilité écologique, par le militantisme, par la sensibilisation de son entourage, en exerçant son droit de vote et même par son choix de carrière. Le pouvoir sur ces émissions est collectif et passe par l'implication citoyenne. Ces mesures sont sûrement aussi à prioriser avant la maison écologique.

Cet exercice met en comparaison l'efficacité des mesures qui peuvent être prises individuellement. Il ne va pas sans dire que des mesures à plus grande échelle doivent aussi faire partie de la solution. Pour réduire nos déplacements collectivement, il faut freiner l'étalement urbain (Vivre en ville, 2017). Les besoins en déplacement sont en fait beaucoup occasionnés par l'organisation des territoires. Il faut donc densifier les zones résidentielles et diminuer la taille des terrains. La meilleure méthode pour ce faire est de construire des multilogements à étages. La densification permet de rendre le transport en commun viable et permet

aussi de se rapprocher des services. La mixité des fonctions, c'est-à-dire de mélanger le résidentiel au commercial, permet aussi de rapprocher les emplois et les services des lieux de résidence.

Le mode d'habitation fait donc effectivement partie des solutions principales, mais pas la maison en soi. L'image de la petite maison écologique perdue au milieu de la forêt n'est donc qu'un mirage, voire de l'écoblanchiment. En réalité, elle contribue à l'étalement urbain. Comme à bien des égards en environnement, on cherche souvent à faire mieux, quand la solution la plus efficace est souvent de faire moins.

Les changements requis pour amener son empreinte carbone à un niveau soutenable pour la terre sont drastiques. Ils peuvent impliquer de mettre une croix sur des rêves et des projets de vie. Comment peut-il être possible d'accepter cela? Plusieurs rêvent d'avoir un jour leur grand terrain avec une forêt dans la cour. Certains déclarent que le bonheur c'est de ne pas avoir de voisin. D'autres ont comme projet de vie de faire le tour du monde et d'explorer les cultures. Ce genre d'ambition est le résultat de la culture occidentale moderne. Voyager des centaines de kilomètres par semaine est perçu comme banal de nos jours, mais cette réalité n'a jamais existé dans l'histoire de l'humanité avant l'époque actuelle. Une reconstruction du système de valeur de la société nord-américaine est donc peut-être nécessaire. Il faudrait tendre vers une société qui valorise moins la consommation et les grands déplacements.

Avant de conclure, à la lumière de toutes ces informations, tentons de se centrer sur les solutions. Voici donc, quelles pourraient être les étapes d'une stratégie générale pour créer un plan de réduction de ses émissions personnelles :

1. Analyser ses sources d'émission et tenter, autant que possible, de les quantifier;
2. Se doter d'un objectif de réduction;
3. Dresser une liste exhaustive d'actions potentielles visant à réduire ses émissions;
4. Pour chaque action, quantifier son potentiel de réduction;
5. Pour chaque action, évaluer également le niveau d'effort ou de sacrifice requis pour l'accomplir;

Cette nouvelle étape est importante puisque la valeur d'un effort est subjective. Idéalement, donner une valeur d'effort quantitative de 1 à 10 pour chaque action. Ainsi, accomplir une action qui requiert un effort de valeur 4 devrait être aussi exigeant que d'accomplir deux actions évaluées à 2 sur la même échelle.

Il pourrait convenir de faire le même exercice pour les potentiels de réduction. Par exemple, donner une valeur de 10 à l'action ayant le plus grand potentiel de réduction et attribuer une valeur aux autres en conservant toute proportion des potentiels de réduction. Ainsi, si une action a un potentiel de réduction 20 fois plus petit que l'action de valeur 10, elle doit avoir une note de 0,5. Ensuite :

- Diviser la cote de potentiel de réduction par la cote d'évaluation de l'effort pour obtenir une cote globale de l'action (on veut maximiser le résultat et minimiser l'effort);
- Ordonner les actions de la plus grande cote globale jusqu'à la plus petite;
- Dans les cas où les actions ne sont pas interdépendantes, sélectionner les actions en commençant par le haut de la liste et additionner les potentiels de réduction en GES;
- Sélectionner autant d'actions que nécessaire pour que le total atteigne la cible de réduction

Les tableaux 8.3 et 8.4 montrent en exemple une liste d'actions évaluées avant le tri et après le tri, ce qui aide à mieux visualiser l'exercice. Au deuxième tableau s'ajoutent le total des réductions et le total des efforts. Si l'objectif de réduction dans cet exemple était de 5 tCO<sub>2</sub>eq/a, le total des réductions montre que les 5 premières actions doivent être réalisées pour surpasser cette valeur (voir tableau 8.4). Si le résultat n'est pas satisfaisant, il est possible de réévaluer le niveau d'effort de certaines actions pour réorganiser l'ordre des actions. On voit par exemple dans la colonne « potentiel de réduction » au tableau 8.4 que la personne pourrait décider, selon ses intérêts, de réduire ses déplacements en voiture d'un troisième quart pour se permettre manger plus de viande.

**Tableau 8.3 Liste des actions évaluées avec le potentiel de réduction en tCO<sub>2</sub>eq**

Code	Action	Potentiel de réduction	Cote de réduct.	Cote de l'effort	Cote globale	Réduct. totale
M1	Apporter des modifications simples à la maison	0,1	0,625	2	0,31	0,1
M2	Apporter de grandes modifications à la maison	0,1	0,625	7	0,09	0,2
V1	Prendre l'avion 1 an sur 2	1	6,25	1	6,25	1,2
V2	Prendre l'avion 1 an sur 5	0,5	3,125	4	0,78	1,7
A1	Manger un peu moins de viande	0,5	3,125	1	3,13	2,2
A2	Devenir presque végétarien	0,8	5	3	1,67	3
A3	Devenir végétalien	0,1	0,625	9	0,07	3,1
D1	Réduire déplacements en voiture du quart	1,4	8,75	3	2,92	4,5
D2	Réduire déplacements en voiture d'un autre quart	1,4	8,75	7	1,25	5,9
D3	Réduire déplacements en voiture d'un 3e quart	1,4	10	9	1,11	7,3

**Tableau 8.4 Actions évaluées et triées en ordre de priorité avec le potentiel de réduction en tCO<sub>2</sub>eq**

Code	Action	Potentiel de réduction	Cote de réduct.	Cote de l'effort	Cote globale	Réduct. totale	Effort total
V1	Prendre l'avion 1 an sur 2	1	6,25	1	6,25	1	1
A1	Manger un peu moins de viande	0,5	3,125	1	3,13	1,5	2
D1	Réduire déplacements en voiture du quart	1,4	8,75	3	2,92	2,9	5
A2	Devenir presque végétarien	0,8	5	3	1,67	3,7	8
D2	Réduire déplacements en voiture d'un autre quart	1,4	8,75	7	1,25	5,1	15
D3	Réduire déplacements en voiture d'un 3e quart	1,4	10	9	1,11	6,5	24
V2	Prendre l'avion 1 an sur 5	0,5	3,125	4	0,78	7	28
M1	Apporter des modifications simples à la maison	0,1	0,625	2	0,31	7,1	30
M2	Apporter de grandes modifications à la maison	0,1	0,625	7	0,09	7,2	37
A3	Devenir végétalien	0,1	0,625	9	0,07	7,3	46

Peu importe la grandeur de l'objectif, cette technique permet de prioriser les actions à entreprendre. Cela demande un certain travail et l'étape de priorisation peut être un peu moins simple si certaines actions sont interdépendantes. Par exemple, si on opte pour une voiture électrique, il faut ajuster les réductions sur les déplacements en conséquence. Dans tous les cas, l'important c'est de se centrer sur l'empreinte globale. Il peut aussi être plus réaliste de faire évoluer nos cibles de réduction sur un certain nombre d'années.

Enfin, il faut se rappeler que de s'engager pour sa planète c'est de réduire ses émissions de GES, mais c'est aussi de réduire ses autres impacts environnementaux. Cette approche quantitative peut s'appliquer à tous les autres types d'impacts, comme les rejets de polluants toxiques ou la production de déchets.

## CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif général d'évaluer l'impact, sur l'empreinte carbone, de l'intégration de différents concepts d'habitation écologique à une maison unifamiliale québécoise moyenne. Il comptait également six objectifs spécifiques qui, avec l'objectif général, ont tous été atteints.

Le travail visait d'abord à définir les caractéristiques d'une maison unifamiliale moyenne québécoise et à identifier les sources d'émissions de GES significatives associées à toutes les phases du cycle de vie de cette maison. Il devait également faire la sélection des bons outils et de la bonne méthode pour effectuer la quantification.

La consultation d'experts et une recherche exhaustive ont permis de bien définir les caractéristiques d'une maison représentant les modèles encore les plus couramment construits au Québec. La littérature a également montré que la meilleure méthode pour quantifier les GES d'une habitation était l'ACV. C'est IE qui s'est présenté comme étant le meilleur logiciel pour effectuer l'ACV et quantifier les émissions intrinsèques d'une maison au Québec, étant donné sa réputation et son accessibilité. Pour la quantification des émissions opérationnelles, il fallait essentiellement évaluer la consommation d'énergie et le logiciel HOT2000, offert gratuitement par le gouvernement canadien, s'est avéré être une excellente option pour la réalisation de cette tâche. Parallèlement à ces démarches, les différentes sources d'émissions de GES des maisons ont pu être facilement identifiées.

Cet essai avait ensuite pour but d'évaluer l'empreinte carbone totale annuelle de la maison québécoise moyenne et celles de maisons équivalentes, mais intégrant différents concepts d'habitation écologique. La comparaison des résultats de ces quantifications voulait déterminer la pertinence de ces concepts d'habitations écologiques quant à leur impact sur l'empreinte carbone globale de la maison. Le but était finalement de comparer la mesure des potentiels de réduction avec l'empreinte carbone totale d'un citoyen québécois moyen.

Une variété intéressante de concepts d'habitation écologique a pu être évaluée grâce à ce travail. Au total, une vingtaine de modifications individuelles ont été examinées. Certaines contraintes et limites, principalement le temps alloué, ont cependant limité le nombre de combinaisons qui ont pu être testées. La compréhension de l'interrelation des modifications a toutefois permis d'extrapoler et d'imaginer l'effet de certaines combinaisons sans les avoir modélisées.

Le premier constat qui ressort de cette quantification est que les émissions de la maison moyenne québécoise, abritant deux habitants, s'élèvent à 1 259 kgCO<sub>2</sub>eq annuellement. Les émissions opérationnelles contribuent à 65% de cette somme et l'autre 35% des émissions est intrinsèque. Le Québec et ses habitants sont responsables d'émissions pouvant être évaluées à environ 15 000 kgCO<sub>2</sub>eq par

personne par année. La part de l'habitation ne représente donc qu'autour de 4% de l'empreinte individuelle moyenne pour les résidents de ce type de maison.

Suite aux analyses, différentes limites du projet ont été discutées, soit sur l'applicabilité des résultats, la précision de ceux-ci et leur complétude. Ce travail a finalement permis de fournir des recommandations. Celles-ci portaient d'abord sur la méthode utilisée et suggéraient principalement de considérer l'aspect temporel dans les ACV.

Des recommandations étaient ensuite apportées spécifiquement sur les mesures à prioriser pour réduire les émissions d'une maison unifamiliale au Québec. Les résultats ont montré qu'il était prescrit en priorité d'éviter les systèmes de chauffage aux énergies fossiles, car ils font minimalement plus que tripler les émissions globales de la maison. La plupart des concepts écologiques se sont avérés efficaces, dans une moindre mesure, pour réduire l'empreinte carbone de la maison de référence. La combinaison de plusieurs d'entre eux permet de retrancher près de la moitié de ses émissions.

Pour terminer, une réflexion tentant de relativiser le potentiel de réduction des émissions de la maison avec l'individu mène à des recommandations plus générales pour le citoyen québécois. Il est principalement montré que d'autres sphères d'activité contribuent de façon plus importante à l'empreinte carbone individuelle au Québec. Afin de réduire significativement ses émissions, le citoyen doit apporter des changements à son mode de vie afin de minimiser ses déplacements. Il peut aussi tendre vers une alimentation moins émettrice pour améliorer son bilan significativement. D'autres moyens sont à prioriser et l'adaptation de son habitation, ne serait-ce qu'en complément, ne se révèle que très peu pertinente avec un potentiel de réduction de l'empreinte globale individuelle de moins de 2%.

Ce travail a permis de mettre en évidence, grâce à la quantification rigoureuse d'émissions, l'efficacité de certaines mesures de réduction de l'empreinte carbone des citoyens québécois. Il a permis principalement de mesurer la pertinence d'investir dans les différents concepts d'habitation écologique. La lutte aux changements climatiques demande l'implication de toutes les entités, des gouvernements aux citoyens en passant par les entreprises. Chacune doit agir judicieusement sur les aspects pour lesquels elle exerce un contrôle. Évidemment, avec tout cela, il faudra aussi prendre soin de considérer les autres enjeux environnementaux, l'aspect économique et la cause sociale et humanitaire. L'environnement n'est peut-être qu'un des piliers du développement durable, mais il a longtemps été négligé et il demeure qu'il est aujourd'hui le plus urgent à adresser.

## RÉFÉRENCES

- Bailes, A. (2012, 26 mars). How Much Air Leakage in Your Home Is Too Much? *Energy Vanguard*. <https://www.energyvanguard.com/blog/how-much-air-leakage-in-your-home-is-too-much/>
- Barrier sciences group. (s. d.). *ACH at a Glance | Barrier Sciences Group*. <https://www.barriersciences.com/achataglance>
- Bastien, A. et Lacharité, B. (2010). *L'analyse du cycle de vie dans le domaine du bâtiment*. Voir vert - Le portail du bâtiment durable au Québec. <https://www.voirvert.ca/nouvelles/dossiers/acv>
- Broan. (s. d.). *Broan® HE Series High Efficiency Heat Recovery Ventilator, 250 CFM at 0.4 in. w.g.* <https://www.broan-nutone.com/en-us/product/freshairsystems/hrv250te>
- Canada, R. naturelles. (2018, 5 février). *outils-professionnels-lindustrie*. Ressources naturelles Canada. <https://www.rncan.gc.ca/efficacite-energetique/efficacite-energetique-maisons/decouvrez-occasions-professionnelles/outils-professionnels-lindustrie/20597>
- Canadian Wood Council. (s. d.). [https://www.awc.org/pdf/greenbuilding/epd/AWC\\_EPD\\_NorthAmericanSoftwoodPlywood\\_20200605.pdf](https://www.awc.org/pdf/greenbuilding/epd/AWC_EPD_NorthAmericanSoftwoodPlywood_20200605.pdf)
- Carbon Brief. (2016, 20 octobre). *Review: 7 key scenes in Leonardo DiCaprio's climate film Before the Flood*. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/7-key-scences-leonardo-dicaprio-climate-film-before-the-flood>
- Carboneutre. (2020, 21 mai). L'empreinte carbone des Québécois. *Carboneutre*. <https://www.carboneutre.ca/lempreinte-carbone-des-quebecois/>
- CIRAIG. (2010). dynCO2 : Calculateur d'empreinte carbone dynamique. *CIRAIG*. <https://ciraig.org/index.php/fr/project/dynco2-calculateur-dempreinte-carbone-dynamique/>
- CIRAIG. (2015). Mémoire du CIRAIG sur la cible de réduction d'émissions de GES du Québec pour 2030. *CIRAIG*. <https://ciraig.org/index.php/fr/project/memoire-du-ciraig-sur-la-cible-de-reduction-demissions-de-ges-du-quebec-pour-2030/>
- CIRAIG. (2016). Comparaison des véhicules électriques et des véhicules conventionnels en contexte québécois. *CIRAIG*. <https://ciraig.org/index.php/fr/lca-study/comparaison-des-vehicules-electriques-et-des-vehicules-conventionnels-en-contexte-quebecois/>
- CIRAIG. (s. d.-a). Analyse du cycle de vie. *CIRAIG*. <https://ciraig.org/index.php/fr/analyse-du-cycle-de-vie/>
- CIRAIG. (s. d.-b). *Analyse du cycle de vie - CIRAIG*. <https://ciraig.org/index.php/fr/analyse-du-cycle-de-vie/>
- Comparer 3 Prix Thermopompes. (2019, 31 janvier). Top 15 thermopompes murales 2021 au Québec | *Comparer 3 Prix Thermopompes*. <https://comparer3prixthermopompes.ca/conseils/top-15-thermopompes-murales-2019/>
- Dirat, G. (2020). *L'assiette des Québécois passée au crible climatique*. Le Devoir. <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/586073/etude-l-assiette-des-quebecois-passee-au-crible-climatique>
- Earth.org. (2020, 14 septembre). *The Biggest Environmental Problems Of 2020*. Earth.Org - Past | Present | Future. <https://earth.org/the-biggest-environmental-problems-of-our-lifetime/>

- ECC. (2021). *Canada. 2021 National Inventory Report (NIR) | UNFCCC*.  
<https://unfccc.int/documents/271493>
- Écohabitation. (2016). *Liants hydrauliques alternatifs / béton écologique*.  
<https://www.ecohabitation.com/guides/2490/les-liants-hydrauliques-alternatifs-pour-beton/>
- Écohabitation. (2020a). *Dalle de béton flottante : guide, avantages et inconvénients*.  
<https://www.ecohabitation.com/guides/2187/dalle-de-beton-flottante-etape-par-etape-avantages-et-inconvenients/>
- Écohabitation. (2020b). *Déclaration environnementale de produit (DEP): l'avenir du bâtiment durable*.  
<https://www.ecohabitation.com/guides/3600/la-declaration-environnementale-de-produits-dep-une-cle-pour-evaluer-limpact-des-batiments/>
- Écohabitation. (2020c). *Trucs et astuces pour rendre étanche votre maison*.  
<https://www.ecohabitation.com/guides/2669/trucs-et-astuces-pour-rendre-etanche-votre-maison/>
- Écohabitation. (2021a). *Comment choisir un échangeur d'air VRC? - Ventilateur Récupérateur de Chaleur*.  
<https://www.ecohabitation.com/guides/2570/recommandations-pour-lachat-dun-vrc/>
- Écohabitation. (2021b). *Photovoltaïque Québec: quelle rentabilité? Comment choisir?*  
<https://www.ecohabitation.com/guides/3599/rentabilite-empreinte-carbone-point-pertinence-panneaux-solaires-au-quebec/>
- EPD International. (2018). *S-P-02290 - KOBE-CZ Hemp Fibre Insulation*.  
<https://www.environdec.com/library/epd2290>
- Équiterre. (2017). *Analyse du cycle de vie de la maison du développement durable*, 54.
- Famille Québec. (2021). *Démographie : la population du Québec et les familles*.  
<https://www.mfa.gouv.qc.ca/fr/Famille/chiffres-famille-quebec/chiffres-famille/Pages/demographie-population-familles.aspx>
- Fellows, G. K. et Dobson, S. (2017). Embodied Emissions in Inputs and Outputs: A Value-Added Approach to National Emissions Accounting. *Canadian Public Policy*, 43(2), 140-164.  
<https://doi.org/10.3138/cpp.2016-040>
- Gouvernement du Canada, R. naturelles C. (2020, 30 janvier). *Secteur résidentiel Québec1 Tableau 1 : Consommation d'énergie secondaire et émissions de GES par source d'énergie*.  
<https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP&sector=res&juris=qc&rn=1&page=0#footnotes>
- Hafner, A. et Rüter, S. (2018). Method for assessing the national implications of environmental impacts from timber buildings-an exemplary study for residential buildings in Germany. *Wood and fiber science: journal of the Society of Wood Science and Technology*, 50, 139-154.  
<https://doi.org/10.22382/wfs-2018-047>
- Hydro-Québec. (2021). *Taux d'émission de GES associés à l'électricité*.  
<https://www.hydroquebec.com/developpement-durable/documentation-specialisee/taux-emission-ges.html>
- Hydro-Québec. (s. d.-a). *Avantages et inconvénients des panneaux solaires au Québec*.  
<https://www.hydroquebec.com/solaire/panneaux-solaires.html>



- Hydro-Québec. (s. d.-b). *Savez-vous comment consomme votre habitation ?*  
<https://www.hydroquebec.com/residentiel/espace-clients/consommation/outils/utilisation-electricite.html>
- Independent. (2021, 24 février). *Climate crisis 'biggest security threat humans have faced', Sir David Attenborough tells UN*. The Independent. <https://www.independent.co.uk/climate-change/news/david-attenborough-climate-security-threat-b1806348.html>
- International Organization for Standardization. (s. d.). *ISO 14064-1:2006*. ISO.  
<https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/83/38381.html>
- Jackson, R. (s. d.). *The Effects of Climate Change*. Climate Change: Vital Signs of the Planet.  
<https://climate.nasa.gov/effects>
- LEEDuser. (2017, 2 septembre). *Athena Impact Estimator*. LEEDuser.  
<https://leeduser.buildinggreen.com/content/athena-impact-estimator>
- Lenton, T. M., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W. et Schellnhuber, H. J. (2019). Climate tipping points — too risky to bet against. *Nature*, 575(7784), 592-595.  
<https://doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0>
- Magwood, C. (2019). Peterborough, Ontario, Canada, 86.
- Malin, N. (2005). Life Cycle Assessment for Whole Buildings: Seeking the Holy Grail. *Building Design & Construction*, 6-11.
- MELCC. (2019). Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990, 44.
- MELCC. (2020). Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2018 et leur évolution depuis 1990, 48.
- Mignot, G. et Duchaine, P. (2020, 17 avril). *Eco-Habitat S1600, la maison ultra sobre en carbone*.  
<https://www.ecohabitation.com/guides/3538/eco-habitat-s1600-la-maison-ultra-sobre-carbone/>
- Muralikrishna, I. V. et Manickam, V. (2017). *Life Cycle Assessment - an overview* | *ScienceDirect Topics*.  
<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/life-cycle-assessment>
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestad, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Zhang, H., Aamaas, B., Boucher, O., Dalsøren, S. B., Daniel, J. S., Forster, P., ... Shine, K. (2013). IPCC, AR5, Ch8 Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, 82.
- Nasa. (2021). *The Causes of Climate Change*. Climate Change: Vital Signs of the Planet.  
<https://climate.nasa.gov/causes>
- NASA. (s. d.). *The Study of Earth as an Integrated System*. Climate Change: Vital Signs of the Planet.  
[https://climate.nasa.gov/nasa\\_science/science](https://climate.nasa.gov/nasa_science/science)
- Nathan, D. (2018, 17 mai). *Voyagez, calculez, compensez!* Unpointcinq.  
<https://unpointcinq.ca/innovation/calcul-ges-voyages/>
- Office de l'efficacité énergétique. (2013). *Choix et utilisation des appareils ménagers à l'aide d'ÉnerGuide*.  
<https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=M144-249-2013-fra&op=pdf&app=Library>

- Owens-Corning\_EPD\_FOAMULAR-XPS-Insulation-2020.pdf. (s. d.).  
[https://www.transparencycatalog.com/assets/uploads/pdf/Owens-Corning\\_EPD\\_FOAMULAR-XPS-Insulation-2020.pdf](https://www.transparencycatalog.com/assets/uploads/pdf/Owens-Corning_EPD_FOAMULAR-XPS-Insulation-2020.pdf)
- Pre-Sustainability. (2012). *LCA standards and guidelines: an overview*. PRé Sustainability. <https://pre-sustainability.com/articles/lca-standards-and-guidelines-a-recent-overview/>
- Shrink That Footprint. (2012, 22 novembre). 3: Carbon targets for your footprint. *shrinkthatfootprint.com*.  
<http://shrinkthatfootprint.com/carbon-targets-for-your-footprint>
- Sodagar, B., Rai, D., Jones, B., Wihan, J. et Fieldson, R. (2011). The carbon-reduction potential of straw-bale housing. *Building Research & Information*, 39(1), 51-65.  
<https://doi.org/10.1080/09613218.2010.528187>
- Sustainable Minds. (s. d.). *SM Transparency Catalog*. <https://www.transparencycatalog.com/>
- SWEP. (s. d.). *1.5 Energy balance - SWEP*. <https://www.swep.net/refrigerant-handbook/1.-basic-heat-transfer/as3/>
- Thibault, A. (2020, 30 novembre). Alain Thibault - Consultation d'un expert sur les pratiques québécoises en construction.
- Thibault, B. (2019). *Essais et mémoires - Centre universitaire de formation en environnement et développement durable - Université de Sherbrooke*.  
<https://www.usherbrooke.ca/environnement/essais-et-memoires/>
- Thibodeau, C. (2020). Entrevue avec Charles Thibodeau (CT Consultant).
- Thode, D. (2017). Analyse du cycle de vie de la Maison du développement durable, 54.
- Union of Concerned Scientists. (2020). *Each Country's Share of CO2 Emissions | Union of Concerned Scientists*. <https://www.ucsusa.org/resources/each-countrys-share-co2-emissions>
- U.S. Green Building Council. (2020). *Whole-Building LCA Tools for LEED v4 and v4.1 | U.S. Green Building Council*. <https://www.usgbc.org/education/sessions/whole-building-lca-tools-leed-v4-and-v41-12847253>
- U.S. Green Building Council. (s. d.). *Building life-cycle impact reduction | U.S. Green Building Council*.  
<https://www.usgbc.org/credits/healthcare/v4-draft/mrc1>
- Veeramani, A., Dias, G. M. et Kirkpatrick, S. I. (2017). Carbon footprint of dietary patterns in Ontario, Canada: A case study based on actual food consumption. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1398-1406. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.025>
- Vivre en ville. (2017). *Le poids de l'éparpillement - Vivre en Ville - la voie des collectivités viables*.  
<https://vivreenville.org/poids-eparpillement>
- Voirvert. (s. d.). *Déclaration environnementale de produit (DEP)*. Voir vert - Le portail du bâtiment durable au Québec. <https://www.voirvert.ca/communaute/wiki/declaration-environnementale-produit-dep>
- WWF. (s. d.). *Calculateur d'empreinte écologique*. WWF Suisse. <https://www.wwf.ch/fr/vie-durable/calculateur-d-empreinte-ecologique>
- Zampori, L., Dotelli, G. et Vernelli, V. (2013). Life Cycle Assessment of Hemp Cultivation and Use of Hemp-Based Thermal Insulator Materials in Buildings. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7413-7420. <https://doi.org/10.1021/es401326a>

## ANNEXE 1 – Approximation du PRP de la paille

Tableau A.1 Estimation du PRP de la paille (inspiré de : Sodagar et al., 2011 et Magwood, 2019)

Source	Densité kg/m <sup>3</sup>	Humidité %	PRP fossile kgCO <sub>2</sub> /kg	PRP biog. kgCO <sub>2</sub> /kg	Valeur R R/in	Commentaires
ICE			0.01			CO <sub>2</sub> only
Cascone	110-150	<20%			2.22-2.62	
C.Cornaro					2.22	
BuildGreen.fr				-1.5		
Magwood EPD 1	100		0.0844	-1.72		
Magwood EPD 2	100		0.0779	-1.72		
Green Building Adviser (David Arkin)				-1.62		
Dr. Behzad Sodagar		10%		-1.35		
Atkinson, 2008				-1.36		

	Densité kg/m <sup>3</sup>	PRP total kgCO <sub>2</sub> /kg	PRP fossile kgCO <sub>2</sub> /kg	PRP biog. kgCO <sub>2</sub> /kg	Valeur R R/in	GWP kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
<b>Conservateur</b>	100	-1.2656	0.0844	-1.35	2.4	<b>-126.6</b>
Optimiste	130	-1.71	0.01	-1.72	2.4	-222.3
Médian	100	-1.6356	0.0844	-1.72	2.4	-163.6